

UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA
SEDE QUITO

CARRERA DE:
INGENIERÍA MECÁNICA

Trabajo de titulación previo a la obtención del título de:
INGENIERO MECÁNICO

TEMA:
ANÁLISIS DE LA INFLUENCIA DEL TIEMPO DE APLICACIÓN DEL
TRATAMIENTO TERMOQUÍMICO DE CEMENTADO EN LA DUREZA
SUPERFICIAL DEL ACERO AISI/SAE 1018

AUTOR:
ALEX JAIRO MENDEZ CURISACA

TUTOR:
MILTON SALOMÓN JAMI LEMA

Quito, marzo del 2021

CESIÓN DE DERECHOS DE AUTOR

Yo, Alex Jairo Méndez Curisaca, con C.I 171857133-2, manifiesto mi voluntad y cedo a la Universidad Politécnica Salesiana la titularidad sobre los derechos patrimoniales en virtud que soy autor del trabajo de titulación: ANÁLISIS DE LA INFLUENCIA DEL TIEMPO DE APLICACIÓN DEL TRATAMIENTO TERMOQUÍMICO DE CEMENTADO EN LA DUREZA SUPERFICIAL DEL ACERO AISI/SAE 1018 , el mismo que ha sido desarrollado para optar por el título de Ingeniero Mecánico, en la Universidad Politécnica Salesiana, quedando la Universidad facultada para ejercer plenamente los derechos cedidos anteriormente.

En aplicación a lo determinado en la Ley de Propiedad Intelectual, en mi condición de autor me reservo los derechos morales de la obra antes citada. En concordancia, suscribo este documento en el momento que hago entrega del trabajo final en formato digital a la Biblioteca de la Universidad Politécnica Salesiana.



Alex Jairo Méndez Curisaca

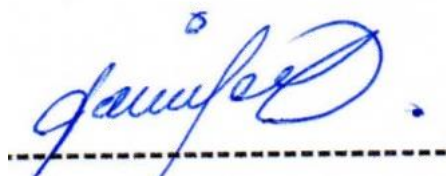
C.I.: 171857133-2

Quito, marzo del 2021.

DECLARATORIA DE COAUTORIA DEL DOCENTE TUTOR

Yo declaro que bajo mi dirección y asesoría fue desarrollado el Proyecto Técnico, ANÁLISIS DE LA INFLUENCIA DEL TIEMPO DE APLICACIÓN DEL TRATAMIENTO TERMOQUÍMICO DE CEMENTADO EN LA DUREZA SUPERFICIAL DEL ACERO AISI/SAE 1018, realizado por Alex Jairo Méndez Curisaca, obteniendo un producto que cumple con todos los requisitos estipulados por la Universidad Politécnica Salesiana, para ser considerado como trabajo de final de titulación.

Quito, marzo del 2021



Milton Salomón Jami Lema

CI: 1707254171

DEDICATORIA

Quiero dedicar esta Proyecto de titulación a mis padres, Ángel Efraín Méndez Moina y Gloria María Curisaca Ortiz que siempre me apoyaron incondicionalmente en la parte moral y económica para llegar a ser un profesional de mi Patria.

A mi hermana Mayra Méndez y mi sobrina Scarleth por la compañía y su cariño que siempre me han sabido brindar. A mi esposa por sus palabras, amor y por brindarme el tiempo necesario para realizarme profesionalmente; y, finalmente, dedico este Trabajo de Titulación a mis hijos, quienes son el regalo más lindo que Dios me ha dado.

Alex Jairo Méndez Curisaca

AGRADECIMIENTO

A mis padres, ejemplo de rectitud, honestidad y trabajo; quienes son una parte muy importante en mi vida a quienes me debo, por su cariño y dedicación; comprensión y consejos que me han brindado durante toda mi vida... Gracias por haber creído en mí siempre.

A mi esposa, por siempre apoyarme y demostrarme su amor todos los días... Gracias por regalarme dos hermosos hijos que son mi motivación y mi motor, quienes me impulsan día a día a superar todas las adversidades y a ser un mejor ser humano.

Este trabajo debe ser reconocido como una labor conjunta realizada con mi Tutor, Milton Salomón Jami Lema, a quien le debo gran parte de mi aprendizaje; asimismo agradezco a mis maestros por todo el tiempo y esfuerzo que dedicaron a compartir sus conocimientos y así, luego, poderlos aplicar en la vida real.

Alex Jairo Méndez Curisaca

ÍNDICE GENERAL

CESIÓN DE DERECHOS DE AUTOR.....	i
DECLARATORIA DE COAUTORIA DEL DOCENTE TUTOR.....	ii
DEDICATORIA	iii
AGRADECIMIENTO	iv
INDICE GENERAL.....	v
ÍNDICE DE FIGURAS.....	viii
ÍNDICE DE TABLAS	x
RESUMEN.....	x
ABSTRACT.....	xii
INTRODUCCIÓN	- 13 -
CAPÍTULO I.....	- 15 -
1.1 Introducción.....	- 15 -
1.2 Aceros al carbono	- 17 -
1.3 Sistema de numeración de los aceros	- 18 -
1.4 Acero AISI / SAE 1018.....	- 20 -
1.5 Propiedades mecánicas	- 21 -
1.6 Dureza superficial.....	- 21 -
1.7 Tratamientos térmicos	- 23 -
1.8 Templado.....	- 24 -
1.9 Cementado.....	- 25 -
1.10 Revenido	- 26 -
1.11 Fluidos para enfriamiento de tratamientos térmicos.....	- 27 -
CAPÍTULO II	- 30 -
2.1 Parámetros en los tratamientos térmicos	- 31 -

2.2	Diseño factorial completo	31 -
2.3	Fabricación de probetas	33 -
2.4	Análisis del material base	35 -
2.4.1	Metalografía	35 -
2.4.2	Espectrofotometría	40 -
2.4.3	Dureza superficial	42 -
2.5	Cementado	46 -
2.6	Templado	48 -
2.7	Revenido	49 -
CAPÍTULO III		51 -
3.1	Procedimiento experimental de cementado	51 -
3.2	Procedimiento experimental de templado	53 -
3.3	Procedimiento experimental de revenido	55 -
CAPÍTULO IV		56 -
4.1	Resultados de ensayos de dureza	56 -
4.2	Validación de datos experimentales obtenidos	57 -
4.3	Análisis ANOVA	58 -
4.4	Cálculo de expresiones ANOVA	60 -
4.4.1	Grados de libertad	60 -
4.4.2	Suma de cuadrados totales	61 -
4.4.3	Varianza	61 -
4.4.4	Varianza para cada Factor	62 -
4.4.5	Cálculo del error	62 -
4.4.6	Cálculo del error de la varianza	63 -
4.4.7	Cálculo de la razón de varianza o prueba F	63 -
4.4.8	Influencia de los factores sobre la respuesta	63 -
4.5	Resumen del análisis ANOVA	64 -

4.6	Validación análisis de varianza ANOVA.....	65 -
4.7	Efectos principales e interacciones de parámetros	65 -
4.8	Diagrama de Pareto	66 -
4.9	Análisis económico del Proyecto de Investigación	67 -
CONCLUSIONES		69 -
RECOMENDACIONES		71 -
BIBLIOGRAFÍA		72 -
ANEXOS		

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Diagrama hierro-carbono.....	18 -
Figura 2. Descripción de la numeración para el AISI / SAE 1018	19 -
Figura 3. Diagrama esfuerzo-deformación.	21 -
Figura 4. Ensayos de dureza.....	22 -
Figura 5. Etapas del tratamiento térmico	23 -
Figura 6. Temperaturas y tiempos de templado	24 -
Figura 7. Temperatura de austenización para temple.....	25 -
Figura 8. Tratamiento térmico para endurecimiento superficial	26 -
Figura 9. Cementado con carbón en contenedor	26 -
Figura 10. Efecto de temperatura de revenido en dureza para el AISI 1018	27 -
Figura 11. Medios de enfriamiento después de tratamientos térmicos	28 -
Figura 12. Tiempos de enfriamiento de diferentes medios	28 -
Figura 13. Diagrama de flujo del procedimiento experimental	30 -
Figura 14. Temperaturas en función de tiempos para los tratamientos térmicos...-	31 -
Figura 15. Procedimiento experimental de los tratamientos térmicos.	32 -
Figura 16. Corte de las secciones cilíndricas del eje de acero AISI / SAE 1018...-	34 -
Figura 17. Torno Emco EMCOMAT 17D.....	34 -
Figura 18. Mecanizado de las probetas de acero AISI / SAE 1018.	35 -
Figura 19. Probetas, antes y después del mecanizado.....	35 -
Figura 20. Metalografía del acero AISI / SAE 1018 a escala de 50 μm	36 -
Figura 21. Mecanizado de la probeta para análisis metalográfico.	36 -
Figura 22. Procedimiento de lijado en agua de la probeta	37 -
Figura 23. Procedimiento de pulido en pulidora de paño	37 -
Figura 24. Nital 4 y ataque químico.....	38 -
Figura 25. Análisis con el microscopio MCXI700.	39 -
Figura 26. Microestructura del acero AISI / SAE 1018 a 20x.....	39 -
Figura 27. Espectrofotómetro Foundry-Master Xpert.....	40 -
Figura 28. Ensayo de espectrofotometría.	41 -
Figura 29. Configuración del software para el espectrofotómetro.	41 -
Figura 30. Ubicación para realizar las mediciones de dureza superficial	42 -
Figura 31. Durómetro Phase II.....	43 -

Figura 32. Medición de dureza superficial a un patrón de medida de baja dureza..	44 -
Figura 33. Medición de dureza superficial a un patrón de medida de alta dureza..	45 -
Figura 41. Medición de dureza superficial del material base.....	45 -
Figura 42. Dureza superficial del material base en HRA.....	46 -
Figura 34. Cajas y carbón para cementado.	46 -
Figura 35. Horno de tratamientos térmicos N7 / H.	47 -
Figura 36. Aceite Durixol W25.....	49 -
Figura 37. Horno para revenido Nabertherm N15 / 65 HA.	50 -
Figura 38. Procedimiento experimental de cementado.	51 -
Figura 39. Preparación para el tratamiento térmico de temple.	53 -
Figura 40. Procedimiento experimental de revenido.	55 -
Figura 43. Serie de tiempo de la dureza superficial de las probetas.	57 -
Figura 44. Probabilidad de la dureza superficial de las probetas.	58 -
Figura 45. Análisis de varianza utilizando MINITAB.....	65 -
Figura 46. Efectos principales para dureza superficial.	66 -
Figura 47. Diagrama de Pareto de efectos estandarizados.....	67 -

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Contenido porcentual de carbono de los aceros	17 -
Tabla 2. Aceros al carbono.....	18 -
Tabla 3. Composiciones SAE para aceros	19 -
Tabla 4. Composición química del acero AISI 1018	20 -
Tabla 5. Propiedades mecánicas del acero AISI / SAE 1018	20 -
Tabla 6. Indicaciones para tratamientos térmicos	24 -
Tabla 7. Parámetros experimentales	31 -
Tabla 8. Matriz de diseño factorial completo en Minitab	32 -
Tabla 9. Requerimientos dimensionales según la Norma ASTM E 18 – 19	33 -
Tabla 10. Microscopio MCXI700	38 -
Tabla 11. Espectrofotómetro Foundry-Master Xpert	40 -
Tabla 12. Resultados de la composición química del acero AISI / SAE 1018	42 -
Tabla 13. Durómetro Phase II	43 -
Tabla 14. Orden de las probetas con relación a los tratamientos térmicos	47 -
Tabla 15. Horno N7 / H.....	49 -
Tabla 16. Procedimiento experimental de cementado	52 -
Tabla 17. Procedimiento experimental de cementado	54 -
Tabla 18. Medidas experimentales de dureza superficial en la probetas	56 -
Tabla 19. Niveles y factores utilizados en el procedimiento experimental.....	59 -
Tabla 20. Terminología para análisis de varianza.....	60 -
Tabla 21. Resumen del análisis de varianza con los datos de dureza superficial ..-	64 -
Tabla 22. Descripción y costo de materiales comprados y servicios profesionales-	68

-

RESUMEN

Esta investigación presenta un estudio acerca de la influencia del tiempo de aplicación del tratamiento termoquímico de cementado en la dureza superficial del acero AISI/SAE 1018. Este acero contiene de 15 a 20 % carbono y suele ser utilizado en aplicaciones donde no sea sometido a cargas fuertes y de bajo desgaste. Al presentar una dureza superficial baja, este acero es tratado térmicamente y también se le aplica un tratamiento termoquímico de cementado.

En el Capítulo I está enfocado en dar a conocer las características de este acero con una temperatura de fusión comprendida entre 1400 a 1800 °C y para los tratamientos térmicos, como el cementado o temple, debe considerarse la temperatura de austenización, generalmente sobre de los 750 °C. La finalidad de un tratamiento térmico es cambiar las propiedades físicas de un acero y alcanzar propiedades que se requieran para determinada aplicación.

El Capítulo II describe la metodología utilizada para la ejecución de este proyecto, así como los diferentes procedimientos experimentales realizados. Además, se requiere conocer las normas establecidas para la realización de este ensayo, utilizando la norma ASTM E18 – 19 para la medición de dureza superficial en una probeta.

El Capítulo III presenta los procedimientos experimentales para el desarrollo de los tratamientos térmicos realizados. La secuencia de estos tratamientos y valores de parámetros como las temperaturas y tiempos de calentamiento han sido indicados para realizar cuatro diferentes tratamientos térmicos de cementado. Posteriormente, se llevaron a cabo el temple y revenido, para incrementar la dureza superficial y aliviar tensiones internas.

Finalmente, el Capítulo IV muestra los resultados que se calcularon y generaron, tanto experimentalmente mediante la medición de la dureza superficial, así como también el análisis de varianza ANOVA, indicando que todos ellos siguen una distribución normal con una confiabilidad del 95 %. Luego se han presentado afirmaciones y comentarios personales a fin de explicar el procedimiento experimental.

Palabras claves: análisis, influencia, tiempo, tratamiento termoquímico, cementado, dureza, acero

ABSTRACT

An analytic study about the influence of application time of the carburizing thermochemical treatment on the surface hardness of the AISI/SAE 1018 steel is presented. This steel contains low carbon and it is usually utilized in applications where strong loads are not applied and the wear is low. This steel has a low hardness, therefore, it is thermally treated and thermochemical treatments, such as carburizing, are also applied, increasing the carbon content as well as surface hardness.

Chapter I is focused on making known the characteristics of this steel with melting temperature between 1400 to 1800 °C and for heat treatments, such as carburizing or quenching, the austenitization temperature must be considered, above 750 °C, generally. The purpose of a heat treatment is to change the physical properties of a steel and achieve the required properties for a certain application.

Chapter II describes the used methodology to carry out this project, as well as the different experimental procedures done. In addition, it is required to know the established standards for conducting a test, in this case, using the ASTM E18 - 19 standard for the measurement of surface hardness in a test specimen.

Chapter III presents the experimental procedures for the development of the thermal treatments that were performed. The sequence of these treatments and values of parameters, such as temperatures and heating times, have been indicated to do four different carburizing heat treatments. Subsequently, quenching and tempering were carried out to increase surface hardness and relieve internal stresses.

Finally, in Chapter IV, obtained results were interpreted, both experimentally through the measurement of surface hardness and the ANOVA analysis, indicating that all of them follow a normal distribution with a reliability of 95%. Personal statements and commentaries have been presented to explain the experimental procedure.

Keywords: analysis , influence, weather, heat treatment , cemented , hardness, steel

INTRODUCCIÓN

Los materiales utilizados para la producción están sometidos a diferentes factores que pueden afectar su funcionamiento y acortar su vida útil para los metales, el parámetro más importante a considerar es la resistencia al desgaste y la corrosión [8]. Los tratamientos térmicos y termoquímicos buscan aumentar la dureza de un metal y también mejorar su ductilidad, sin embargo, los valores de estas propiedades se ven afectados por las temperaturas de calentamiento [9]. El cementado tiene la finalidad de incrementar la dureza superficial de un metal manteniendo la microestructura interna. Después de calentar hasta la austenita y enfriar rápidamente en aceite, el metal tiene una capa muy fina de endurecimiento, por lo que en aceros de bajo carbono, se requiere adicionalmente un tratamiento termoquímico, como el cementado, donde se aumenta el porcentaje de carbono [10]. El acero estructural es ampliamente utilizado en diferentes industrias, pero en su estado de suministro no presenta las propiedades requeridas según la aplicación, el material se va a corroer y fallar [11].

Por las tendencias actuales en el sector de la manufactura, es necesario el uso de materiales que presenten mejores propiedades para determinadas aplicaciones. El acero AISI/SAE 1018 es un material utilizado en la industria ecuatoriana con aplicaciones en levas, juntas, bushing, pines, entre otros [5]. Estos elementos están sometidos a esfuerzos elevados, así como al desgaste superficial. Es por esta razón que se necesita mejorar las propiedades mecánicas, por lo que se debe realizar tratamientos térmicos o termoquímicos, como cementado o carburizado, que permita obtener superficies con una alta dureza proporcionando resistencia al desgaste, así como un aumento en el límite de fatiga del material. Con este tratamiento termoquímico, las propiedades del acero mejoran, generando un material a ser utilizado en aplicaciones con diversos requerimientos en el sector de la manufactura local. Entonces, esta investigación pretende determinar cómo influye el tiempo de cementado en la dureza del acero, así como la influencia de las temperaturas en los tratamientos térmicos de temple y revenido, proporcionando los parámetros que generen la dureza más elevada para dar a conocer esta información comercialmente.

El objetivo general consiste en analizar la influencia del tiempo de aplicación del tratamiento termoquímico de cementado en la dureza superficial del acero AISI/SAE 1018.

Los objetivos específicos son:

- Desarrollar una fundamentación teórica del tratamiento termoquímico de cementado del acero AISI/SAE 1018.
- Definir el procedimiento de aplicación del tratamiento termoquímico y fabricación de probetas.
- Evaluar los valores de dureza obtenidos considerando la norma ASTM E-18 en las probetas cementadas a la temperatura de austenización de alrededor de 860 °C durante un rango de tiempo entre 6 y 8 horas.
- Establecer la influencia del tiempo de cementado en la dureza superficial de acero AISI/SAE 1018 mediante un método estadístico, sobre los resultados experimentales de dureza.

CAPÍTULO I

FUNDAMENTACIÓN TEÓRICA DE ACEROS Y APLICACIÓN DE TRATAMIENTOS TÉRMICOS

En este Capítulo se ha resumido la información obtenida referente a la producción y aplicación del acero AISI/SAE 1018, así como diferentes tratamientos térmicos para mejorar sus propiedades mecánicas y físicas, analizando la situación actual y el mercado local para estudiar la oferta/demanda de un acero tratado térmica y termoquímicamente.

1.1 Introducción

Un acero con porcentaje menor a al 30 % de carbono, como el AISI/SAE 1018 puede ser utilizado como un elemento estructural o incluso como herramienta. Si este tipo de aceros no son tratados térmica o termoquímicamente, se va a ocasionar un desgaste adelantado y abrasivo, generando una falla y deteniendo un proceso productivo [5]. La importancia de un proceso de cementado es reflejada en la utilidad de brocas ferrosas, ya que una broca que ha sido tratada con cementación puede perforar 10 agujeros en una chapa de 4.7 mm, mientras que una broca sin tratamiento de cementado no pudo completar la primera perforación [5].

El efecto del tiempo de carbonitruración en el templado, resistencia al desgaste y dureza superficial en el acero AISI 1020 es analizado por Pacheco et al [6]. La carburización es hecha en etapas de 2, 4 y 6 horas a una temperatura de 880 °C para ser templadas mediante el método Jominy y finalmente aplicar revenir por una hora bajo una temperatura de 180 °C. La resistencia al desgaste disminuye con el tiempo de tratamiento, teniendo en promedio 57.7 y 37.2 mg a 2 y 6 horas, respectivamente. La dureza obtenida luego de 2 horas es de 59.5 HRC, mientras que, en 6 horas, se alcanza 62.5 HRC. Los resultados del ensayo Jominy son tomados en 20 mediciones a 1.59 mm (1/16 plg) obteniendo 40 HRC y 12 HRC al final.

Salazar et al. [5] estudiaron la cementación de aceros con carbones vegetales en la ciudad de Panamá. El ensayo consiste en tratar térmicamente 10 probetas de AIS/SAE 1018 con carbón de mangle en una caja y con carbón de nance en otra. El cementado

es durante 2 horas a 900 °C para realizar un templado en agua potable para finalmente colocar las probetas en un horno de revenido a 250 °C por 30 minutos. Con el cementado utilizando el primer carbón, las probetas alcanzaron una dureza de 44.38 HRC, mientras que la dureza después del cementado con carbón de nance es 45.27 HRC.

Alemán [7] evalúa la dureza superficial del acero AISI 1020 utilizando un cementado sólido para después aplicar tratamientos térmicos de templado, así como de revenido. En los ensayos se utilizaron probetas cuadradas de 12.5 mm (1/2 plg) en procesos de cementado de 2 a 6 horas a 950 °C obteniendo 3 mm de espesor de capa. Después de un templado y revenido a 850 y 150 °C, respectivamente, las durezas más altas obtenidas son de 45.7, 48.5 y 52.8 HRC con tiempos de cementado de 2, 4 y 6 horas, respectivamente.

Un cementado sólido para un acero con bajo contenido de carbono mediante la adición de carbón orgánico y corazas marinas para incrementar la formación de CO es estudiado por Miranda y Laura [8]. Las temperaturas de cementado, temple y revenido son de 960, 850 y 200 °C, respectivamente, elevando la dureza superficial de suministro de 10 HRC hasta 65.2 y 65.3 HRC luego de 4 y 6 horas de cementado, respectivamente.

El proceso de cementado para un templado desde temperaturas intercríticas en el acero AISI 8620 para después ser revenidas es analizada por Piñeiros et al [9]. Se fabricaron probetas de 19 mm (3/4 plg) de diámetro para cementar a una temperatura de 930 °C por 4 horas, para luego templar y revenir a 780 y 380 °C, respectivamente, variando el tiempo de revenido entre 5, 10 y 15 minutos. Los autores concluyen que, a mayor tiempo de revenido, la dureza va a disminuir, teniendo después del cementado un valor de 63.5 HRC luego de 5 minutos de revenido y de 48.3 HRC luego de 15 minutos.

La influencia del tratamiento térmico de temple a temperaturas intercríticas en las propiedades mecánicas del acero AISI / SAE 1018 es estudiada por Muñoz et al. [9]. Se fabrican 12 probetas que son templadas desde temperaturas calculadas por los autores de 739.29 y 831.96 °C durante 20 minutos, enfriándolas en agua. Los

resultados indican que el esfuerzo a la tensión se incrementa de 1110.6 a 1362.2 MPa a las temperaturas calculadas y, por otra parte, la dureza superficial también aumenta, de 29 hasta 36 HRC al temprar las probetas a esas temperaturas.

1.2 Aceros al carbono

Un acero es una aleación Fe – C, así como porcentajes bajos de otros elementos [12]. El carbono, como elemento en un acero, aumenta la templabilidad y la dureza, así como la resistencia al desgaste, aunque puede disminuir la soldabilidad y la ductilidad [13]. Los aceros son obtenidos en altos hornos o cubilotes para conformar chapas o perfiles, dependiendo de la matriz disponible y los requerimientos del mercado. La temperatura de fusión está comprendida entre 1400 a 1800 °C en función del contenido de carbono que contenga el acero [12].

Para una interpretación más accesible, los aceros han sido clasificados según la Tabla 1, donde se presentan los porcentajes de elementos para aceros y otros materiales ferrosos [1].

Tabla 1. Contenido porcentual de carbono para aceros y materiales ferrosos [12].

		Aceros		Fundiciones
	Carbono C	Aleados	Inoxidables	
Carbono	< 1.67 % de C	1 % de C máximo	0.5 % de C máximo	Entre 1.67 y 6.67 % de C
Otros metales	No supera el 1 %	Como máximo 5 %	5 % mínimo de compuestos de aleación	Porcentajes mínimos para mejora de propiedades

El origen de los aceros de bajo carbono se dio en 1870, donde se lo utiliza como elemento estructural en remplazo del hierro forjado, permitiendo reducir la cantidad de vigas requeridas en una construcción [14]. El acero en este caso de estudio es el AISI / SAE 1018, un acero de bajo carbono, también conocidos como aceros dulces, utilizado para la manufactura de pernos, tuercas, placas y tubos, así como elementos de máquina donde no se necesite una elevada resistencia [11]. Según su contenido de este elemento, en la Tabla 2 se incluye los tipos de aceros al carbono.

Tabla 2. Aceros al carbono [12].

Acero	Carbono [%]
Bajo carbono	Entre 0.05 y 0.30
Mediano carbono	Entre 0.030 y 0.45
Alto carbono	Entre 0.45 y 0.90
De herramientas	Entre 0.90 y 1.50

Los aceros son los de más amplia gama entre los metales ferrosos, dependiendo del comportamiento de su elemento principal, el hierro [14]. El diagrama de fase hierro-carbono donde se han señalado distintas fases está en la Figura 1. Al iniciar el proceso de calentamiento, la aleación está en ferrita (α) que al llegar hasta los 900 °C se va a transformar en austenita (γ). En delta (δ) está a 1400 °C hasta que alcanza los 1539 °C, temperatura de fundición [14].

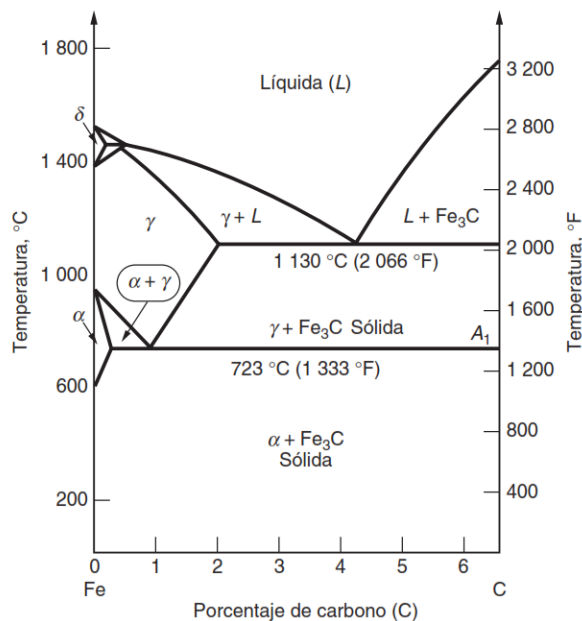


Figura 1. Diagrama hierro-carbono [14].

1.3 Sistema de numeración de los aceros

La necesidad de identificar a los diferentes tipos de acero mediante una codificación tuvo respuesta por la Sociedad de Ingenieros Automotrices (SAE, por sus siglas en inglés) en el año de 1975 [12]. Los prefijos utilizados son letras iniciales mayúsculas para describir el tipo, G para aceros al carbono, A y C en aleaciones de aluminio y

cobre, respectivamente, y S para acero inoxidable [15]. La Tabla 3 presenta los distintos tipos de composiciones para aceros.

Tabla 3. Composiciones SAE para aceros [15].

Código	Tipo	Código	Tipo
G10	Acero al carbono simple	G46	Acero al níquel –molibdeno
G11	Acero al carbono con azufre o fósforo	G48	Acero al níquel –molibdeno
G13	Acero al manganeso	G50	Acero al cromo
G23	Acero al níquel	G51	Acero al cromo
G25	Acero al níquel	G52	Acero al cromo
G31	Acero al níquel-cromo	G61	Acero al cromo-vanadio
G33	Acero al níquel-cromo	G86	Acero al cromo-níquel-molibdeno
G40	Acero al molibdeno	G87	Acero al cromo-níquel-molibdeno
G41	Acero al cromo-molibdeno	G92	Acero al manganeso-silicio
G43	Acero al níquel-cromo-molibdeno	G94	Acero al níquel-cromo-molibdeno

Posteriormente, el Instituto Americano de Materiales Ferrosos y Aceros (AISI, por sus siglas en inglés) ha considerado esta información. La diferencia principal es incorporar una numeración de 4 dígitos, 10XX, donde el primer par indica el tipo de acero según la SAE y el segundo par indica el contenido porcentual de carbono [14]. Para un acero AISI / SAE 1018, se presenta la descripción de la numeración en la Figura 2.

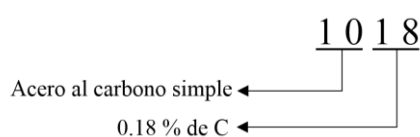


Figura 2. Descripción de la numeración para el AISI / SAE 1018 [14].

La numeración presenta los componentes principales de un acero al carbono, Fe y C, y los restantes elementos aleantes están en porcentajes bajos. Para un acero AISI 10XX, el porcentaje de manganeso es de 0.4 % y conteniendo unas impurezas de S con 0.05 % y P, 0.04 % [16].

1.4 Acero AISI / SAE 1018

Es un acero para cementar que se utiliza en mayor parte para fabricando elementos de dimensiones no considerables [20], expuestas al desgaste, resultando sin importancia la dureza en la parte central. Este acero contiene 20 % de carbono, y se emplea en aplicaciones sin demasiado esfuerzo, requiriendo algo de tenacidad [12]. Es muy utilizado para cementar y la profundidad de adherencia es superior por el efecto que tiene el Mn. La Tabla 4 muestra la composición química del acero AISI / SAE 1018 (ver Anexo 1).

Tabla 4. Elementos presentes para el acero AISI 1018 [12].

Análisis [%]	C	Mn	P	S
AISI / SAE 1018	0.15 - 0.20	0.60	0.04	0.05

Como la mayoría de los grados de acero, el acero AISI / SAE 1018 se puede fabricar en formas estiradas en frío o en caliente, se compra normalmente en su forma estirada en frío [13]. Este es un acero de cementación no aleado, de fácil mecanizado y fabricación de elementos de máquina donde el núcleo no requiera una dureza a considerar [22]. En la industria ecuatoriana es suministrado laminado en frío en medidas pequeñas, hasta 63.5 mm (2.5 plg) o en ejes para torneado en medidas hasta 150 mm (6 plg) [12]. Los valores de propiedades y resistencias del acero AISI / SAE 1018 son mostrados La Tabla 5.

Tabla 5. Propiedades mecánicas del acero AISI / SAE 1018 [12].

Propiedad	Valor
Esfuerzo de cedencia [kg/mm ²]	min 31
Resistencia a la tracción [kg/mm ²]	51 – 71
Elongación	20 %
Reducción de área	57 %
Dureza [HRC]	6

1.5 Propiedades mecánicas

Establecen la manera de desempeñarse al someter el elemento fabrico a esfuerzos [14]. El diseño mecánico está orientado a la fabricación de elementos con una geometría específica y resistir los esfuerzos estimados. Estas estimaciones de diseño deben realizarse considerando las propiedades del material seleccionado. Entre las características internas destacan la resistencia al desgaste y la dureza superficial, ya que mediante el diagrama esfuerzo deformación obtenido al realizar un ensayo de tracción, permite determinar el módulo de elasticidad. En la Figura 3 se muestra un diagrama esfuerzo-deformación, donde el indica la zona elástica, y es el punto de fluencia, u y f son el esfuerzo máximo y a la fractura, respectivamente.

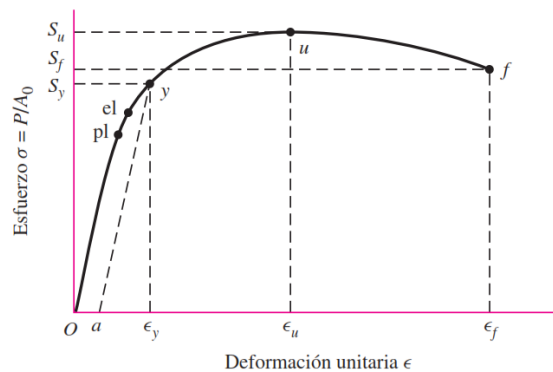


Figura 3. Diagrama esfuerzo-deformación [15].

Las medidas de dureza pueden ser diferentes, dependiendo del tipo de carga que se aplica, si es a tracción o compresión. Otras propiedades importantes son la ductilidad y dureza, ya que indica en forma general, la resistencia a la penetración del material. La dureza ha sido definida entonces como, la capacidad de resistir una indentación constante [3]. Para el acero AISI / SAE 1018 los valores de resistencia a la tensión y a la fluencia son de 400 y 220 MPa, respectivamente y una dureza Brinell de 116 [15].

1.6 Dureza superficial

Mediante tratamientos de varios tipos, se obtiene el endurecimiento superficial, procedimiento que permite dar a una pieza metálica una dureza superficial especial [18]. Los elementos que requieren que se aumente la dureza superficial son los piñones, ejes para flechas, elementos y moldes para matrices, entre otros. Para este

propósito, el acero entra en una atmósfera caliente que ha liberado C, Ni o Bo, para modificar la composición, estructura interna y características del acero [3]. La Figura 4 indica los diferentes tipos de ensayos, así como los cálculos necesarios para obtener la dureza superficial, dependiendo del indentador y de la precarga.

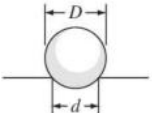

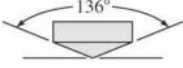
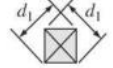
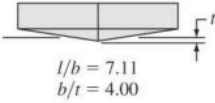
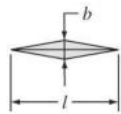
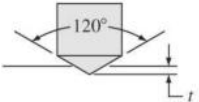

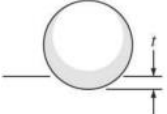

Ensayo	Penetrador	Forma del penetrador		Carga	Fórmula del número de dureza
		Vista lateral	Vista en planta		
Brinell	Esfera de 10 mm fabricada de acero o carburo de wolframio			P	$BHN = \frac{2P}{\pi D(D - \sqrt{D^2 - d^2})}$
Vickers	Pirámide de diamante			P	$VHN = \frac{1.72P}{d_1^2}$
Microdureza Knoop	Pirámide de diamante			P	$KHN = \frac{14.2P}{l^2}$
Rockwell	Cono de diamante			60 kg $R_A =$ 150 kg $R_C =$ 100 kg $R_D =$	$100-500f$
	Esfera de acero de $\frac{1}{16}$ pulgadas			100 kg $R_B =$ 60 kg $R_F =$ 150 kg $R_G =$ 100 kg $R_E =$	$130-500f$
	Esfera de acero de $\frac{1}{8}$ pulgadas				

Figura 4. Ensayos de dureza [16].

Mediante un ensayo de dureza, el instrumento calcula la profundidad de penetración para obtener una medida de dureza. La geometría del indentador se incrusta en el material, al aplicar una precarga establecida [12]. Los ensayos Rockwell de dureza superficial utiliza indentadores angulares y la precarga es menor [3]. El ensayo de dureza Rockwell es utilizado principalmente para aceros con una dureza elevada. Un ensayo practicado regularmente es Jominy, para incrementar la dureza desde el extremo inferior [22].

1.7 Tratamientos térmicos

Procedimientos múltiples para calentar y enfriar un material considerando el tiempo indicado por el fabricante al que se somete un acero para cambiar sus propiedades físicas con el propósito de obtener ciertas propiedades requeridas [4]. Los tratamientos térmicos buscan obtener un acero con características martensíticas y para obtenerlos se los enfría súbitamente en agua o aceite. Un acero es modificado únicamente si durante el templeado se generó una extensa zona martensítica. La presencia de perlita puede generar alteraciones mecánicas que no cumplan con los requerimientos[14].

En la Figura 5, se muestra las tres etapas para un cementado, la etapa de calentamiento considerando la temperatura de austenización, que debe ser mantenida hasta llegar al equilibrio térmico con el acero. Esta temperatura permite el cambio de la microestructura del acero, y es recomendable una estancia de 120 s por cada milímetro del acero. La temperatura de enfriamiento, así como el tiempo, depende del tratamiento térmico realizado [16].

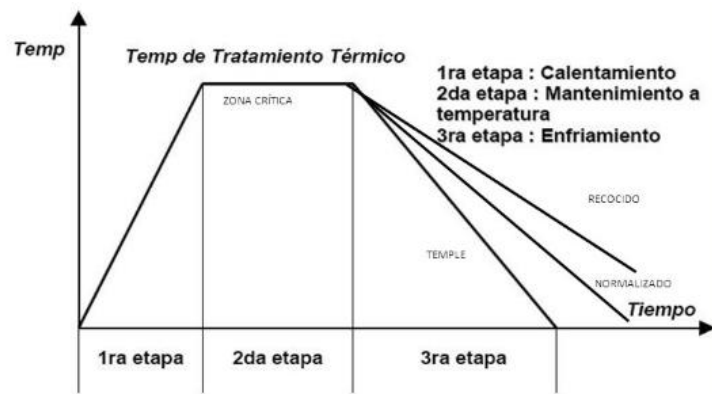


Figura 5. Etapas del tratamiento térmico [17].

El tratamiento térmico es un proceso de manufactura, y está estrechamente relacionado con la metalurgia por lo que son temas de gran interés, teniendo como propósito obtener martensita [15]. Para un acero AISI / SAE 1018, las temperaturas que son recomendadas para cada tratamiento térmico se indican en la Tabla 6.

Tabla 6. Indicaciones para tratamientos térmicos [22].

Tratamiento térmico	Temperatura [°C]
Forjado	1150 – 850
Normalizado	890 – 920
Recocido	650 – 700
Cementado	880 – 950
Templado (en agua)	770 – 800
Revenido	150 – 200
Soldadura	Precalentar de 120 – 180

1.8 Templado

Permite la consolidación de componentes duros y estables, como martensita y vainita [6]. Esto se alcanza con el calentamiento de un acero a una temperatura 50 °C superior a la temperatura crítica, para luego ser enfriado súbitamente. La velocidad con que se enfría el acero debe ser mayor a la temperatura crítica en el templado, para así obtener martensita. Si este enfriamiento tiene una tasa inferior a la temperatura de templado, se va a generar martensita, pero con otras regiones [6].

El procedimiento para templar un acero es calentarlo alrededor de 1000 °C para luego enfriarlo bruscamente en agua o aceite. La combinación de estas acciones, se obtiene una mayor dureza al reducir la ductilidad, es decir, un acero más duro pero más frágil [30]. En la Figura 6 se muestra la profundidad de dureza en redondo de una barra de 12.5 mm (1/2 ") de acero AISI 1018 con un tratamiento térmico de cementado a 925°C por cuatro horas y media, templado en aceite y revenido [21].

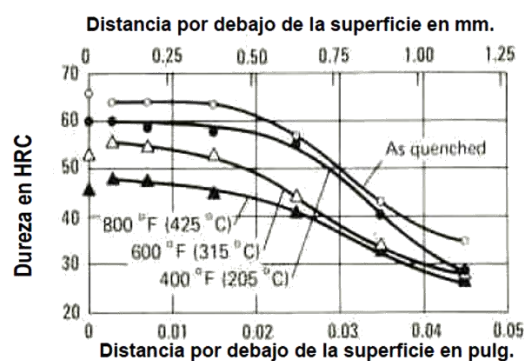


Figura 6. Temperaturas y tiempos de templado [21].

En la Figura 7, se indica cómo realizar el temple de un acero, donde se debe alcanzar la temperatura de austenización, temperatura que es obtenida al analizar el contenido de carbono del acero a tratarse [7].

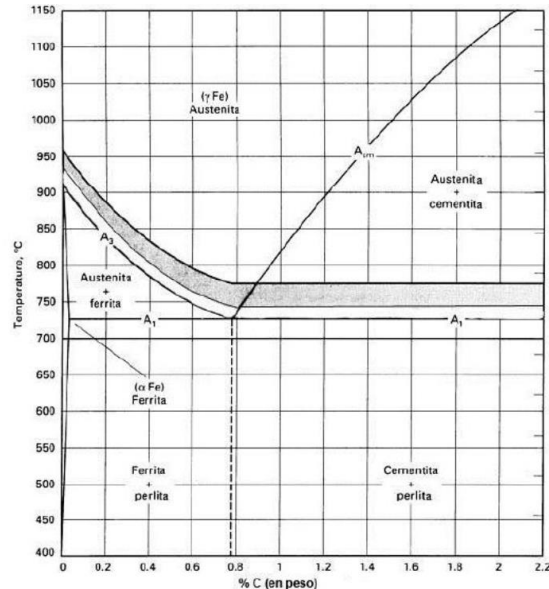


Figura 7. Temperatura de austenización en el templeado [7].

1.9 Cementado

Proceso para añadir C en forma de capa sobre la superficie de un acero incrementando la dureza, así como la resistencia a la fatiga, luego de someter el acero a templeado y revenido. Este tratamiento se realiza en aceros con contenido de C inferior a 0.30 %, llegando a obtener un centro suave con características tenaces y dúctiles [5].

Cuando el contenido de carbono de un acero sea insuficiente para que pueda alcanzar las propiedades superficiales deseadas mediante calentamiento selectivo, hay que recurrir para ello a alterar la composición superficial del metal. El tratamiento más conocido dentro de esta categoría es la cementación. En la cementación, las piezas se rodean de un medio cementante sólido muy rico en carbono, llamado cemento [30].

Este tratamiento termoquímico permite adherir C desde un material, como carbón, generando una atmósfera que transfiera este elemento hacia la superficie del acero. Los principales factores a considerar durante el proceso son composición, temperaturas de austenización y tiempos de permanencia. Así, los aceros para

cementar son de bajo contenido de carbono, aleados y no aleados. La temperatura de tratamiento debe ser superior a la del estado austenítico del acero, y cuanto más elevada sea más rápido será el proceso, aunque existe el riesgo de sobrecalentamiento [20]. La Figura 8 describe el proceso del incremento la dureza superficial.

Descripción de los procesos de tratamiento térmico para endurecimiento superficial					
Proceso	Metales endurecidos	Elemento agregado a la superficie	Procedimiento	Características generales	Aplicaciones características
Carburizado	Acero de bajo carbono (0.2% C), aceros aleados (0.08-0.2% C)	C	Calentar el acero a 870–950°C (1600–1750°F) en una atmósfera de gases carbonosos (carburizado por gas) o sólidos que contienen carbono (carburizado en caja). Después se enfría.	Se produce una superficie dura, con alto carbono. Dureza 55 a 65 HRC. Profundidad de endurecimiento <0.5-1.5 mm (<0.020 a 0.060 pulgadas). Alguna distorsión de la parte durante el tratamiento térmico.	Engranajes, levas, flechas, rodamientos, pernos para pistones, catarinas, placas de embragues.

Figura 8. Descripción del proceso del incremento la dureza superficial.[3].

El procedimiento transfiere carbono al acero para aumentar su porcentaje y es mediante los gases que emana el compuesto cementante al ser expuesto a altas temperaturas. Si se utiliza carbón, la atmósfera interior en el contenedor va a ser en su mayoría de monóxido de carbono [7], procedimiento ilustrado en la Figura 9.

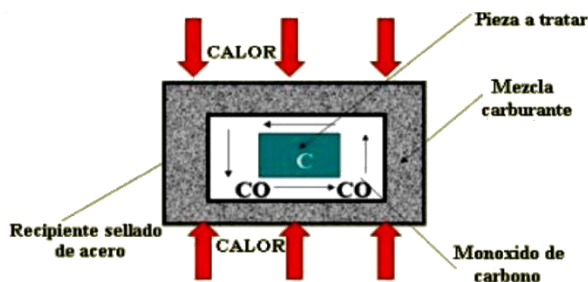


Figura 9. Cementado con carbón en contenedor [7].

1.10 Revenido

Tratamiento térmico utilizado para disminuir la dureza en un acero que ha sido templado, esto se consigue al hacerlo más dúctil y su tenaz, eliminando los esfuerzo internos que produjo el templado [6]. Mediante el revenido, la dureza superficial del acero templado es reducida. La Figura 10 se presenta la influencia de la temperatura de revenido con respecto a una dureza HRC para el acero AISI / SAE 1018 después de un carbonitrurado por dos horas y media.

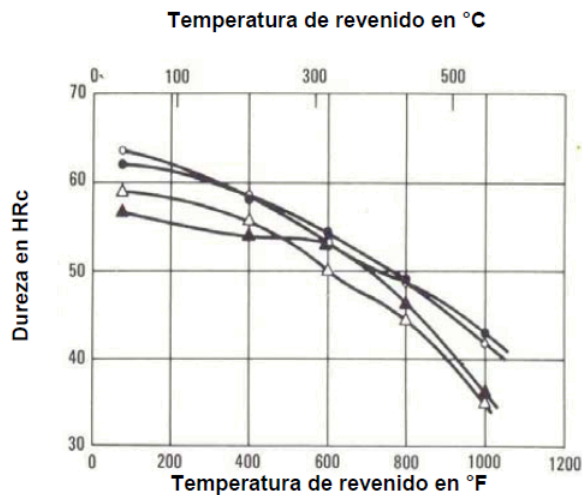


Figura 10. Efecto de la temperatura de revenido en la dureza para el acero AISI 1018 [21].

Un revenido a temperatura de hasta 200°C, erradica las tensiones internas, sin embargo, a temperaturas hasta 400°C se manifiesta una etapa de fragilidad y la resistencia al desgaste es reducida también. Entre 400 a 700 °C, se ha establecido que a mayor temperatura, la ductilidad y tenacidad se incrementan, pero la elasticidad y dureza decrecen [6]. Los tratamientos térmicos que alivian las tensiones de la microestructura son el recocido y el revenido. El revenido busca destruir parcialmente el efecto del temple en un acero, es decir, calentar a una temperatura baja un acero templado para modificar ligeramente la composición molecular alcanzada a la temperatura de austenización [30].

1.11 Fluidos para enfriamiento de tratamientos térmicos

El medio e enfriamiento que se utilice para templar un metal después de un tratamiento térmico debe ser considerando en función de la composición de éste, así como de su geometría y las propiedades que se requieren [31]. En la Figura 11 se presentan los fluidos para enfriamiento comúnmente utilizados.



Figura 11. Medios de enfriamiento después de tratamientos térmicos [31].

El agua es el medio más empleado, principalmente en acero al carbono, ya que crea una capa endurecida por la velocidad de templada crítica, aunque puede provocar tensiones en la microestructura [31]. El aceite también es ampliamente utilizado en enfriamientos, debido a que se evapora más lentamente al ser más viscoso que el agua, generando deformaciones casi nulas y permitiendo trabajar con geometrías más complicadas [31]. Cada medio de enfriamiento va a influir en la dureza y fragilidad del material tratado debido al tiempo que toma enfriarlo, presentado en la Figura 12.

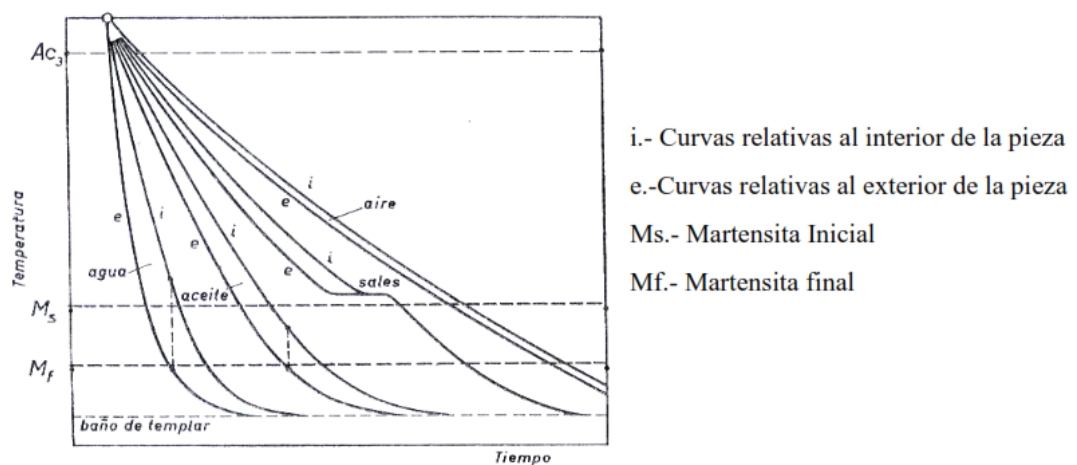


Figura 12. Tiempos de enfriamiento de diferentes medios [31].

Esta investigación está enfocada en mejorar las características mecánicas del acero AISI / SAE 1018 mediante el cementado, un el tratamiento termoquímico complementado con de templado y revenido. Este acero es económico y sencillo de

adquirir localmente, por lo que es utilizado para fabricación de pernos y tuercas, así como elementos estructurales sometidos a bajas cargas. Pero cuando se requiere la fabricación de otras partes que trabajan a elevados esfuerzos y desgastes, se emplean otros tipos de aceros, generalmente más resistentes y duros, pero a la vez, más costosos. Por este motivo, se pretende determinar la dureza superficial del acero AISI / SAE 1018 después de los tratamientos térmicos y analizar las mediciones obtenidas para brindar una alternativa de diseño en el mercado nacional.

CAPÍTULO II

MATERIALES Y METODOLOGÍA EN TRATAMIENTOS TÉRMICOS

El presente capítulo proporciona información del proceso de mecanizado y la obtención de probetas según la Norma ASTM E-18 para la medición de dureza superficial. Además, se ha incluido la información técnica de los equipos, insumos e instrumentos a utilizarse para la obtención de los datos y medidas requeridas para esta investigación. El procedimiento para realizar el análisis experimental se indica en la Figura 13, donde la respuesta de salida son las mediciones de dureza superficial de cada una de las probetas según la matriz.

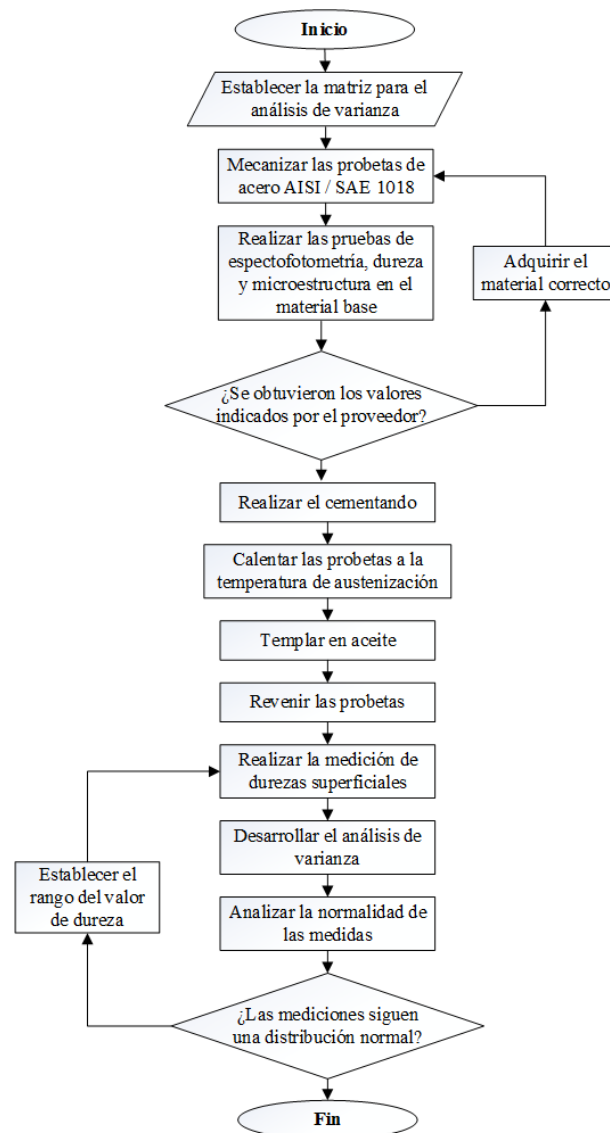


Figura 13. Diagrama de flujo del procedimiento experimental.
Elaborado por: Alex Jairo Méndez Curisaca

2.1 Parámetros en los tratamientos térmicos

Para llevar a cabo los tratamientos térmicos, es necesario calentar elevar la temperatura del acero a la temperatura establecida por el proveedor. El proveedor Böhler indica en la hoja técnica del acero AISI / SAE 1018 (ver Anexo 2) los rangos de temperatura para aplicar cada tratamiento térmico, valores presentados en la Tabla 7.

Tabla 7. Parámetros experimentales [22].

Variable	Valores	
Tiempo de cementado	6 horas	8 horas
Temperatura de cementado	880 °C	950 °C
Temperatura de templado	770 °C	800 °C
Temperatura de revenido	150 °C	200 °C

Entonces, como se puede apreciar, existen 4 variables principales que van a ser modificadas dentro del rango establecido por el proveedor. En la Figura 14, se presenta las temperaturas requeridas en función del tiempo que requieren para realizar cada tratamiento térmico.

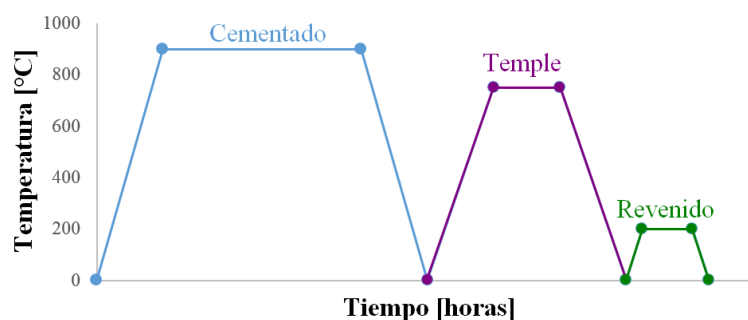


Figura 14. Temperaturas en función de tiempos para los tratamientos térmicos.
Elaborado por: Alex Jairo Méndez Curisaca

2.2 Diseño factorial completo

Para determinar la cantidad de ensayos requeridos en esta investigación, se utiliza el software Minitab, para establecer una matriz de diseño factorial completo mediante los valores de entrada de las cuatro variables. La tabla presenta la matriz de respuesta para determinar la cantidad de ensayos a realizar considerando las variables en estudio.

Tabla 8. Matriz de diseño factorial completo en Minitab.

Probetas	Tiempo de cementado [h]	Temperatura de cementado [°C]	Temperatura de templado [°C]	Temperatura de revenido [°C]
1	8	880	770	150
2	8	950	800	200
3	6	880	800	200
4	6	950	800	200
5	8	880	800	150
6	6	880	800	150
7	6	950	770	150
8	8	880	800	200
9	8	880	770	200
10	6	950	800	150
11	6	880	770	200
12	6	880	770	150
13	8	950	800	150
14	8	950	770	150
15	8	950	770	200
16	6	950	770	200

Elaborado por: Alex Jairo Méndez Curisaca

Al conocer claramente el tiempo y temperatura para el tratamiento termoquímico de cementado, así como las temperaturas de templado y revenido, se puede establecer el procedimiento que necesita realizarse. La Figura 15 explica la metodología a seguir para realizar el procedimiento experimental de los tratamientos térmicos.

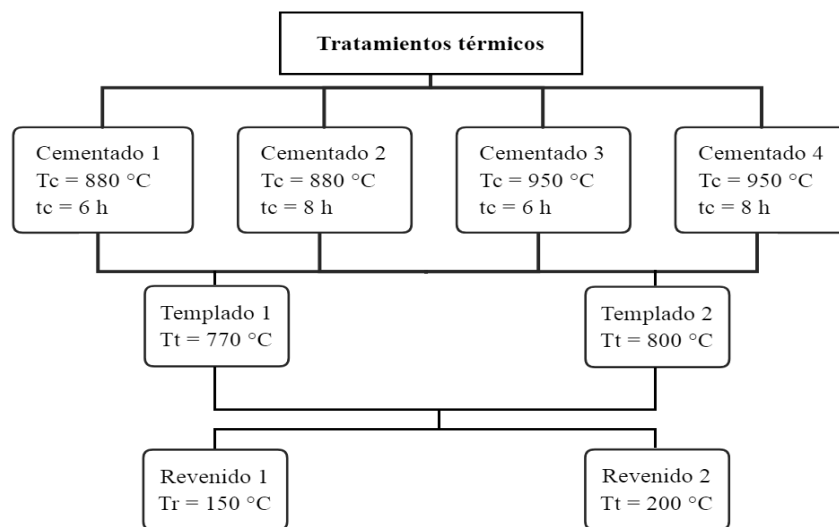


Figura 15. Procedimiento experimental de los tratamientos térmicos.

Elaborado por: Alex Jairo Méndez Curisaca

Se diferencian cuatro tratamientos distintos de cementado variando entre una temperatura de 880 y 950 °C en tiempos de 4 y 6 horas. Para cada uno de estos tratamientos termoquímicos, se requieren 4 probetas, para después, en pares, variar la temperatura de temple de 770 y 800 °C. Y finalmente, cada una de estas probetas templadas va a ser tratada térmicamente con un revenido para aliviar las tensiones microestructurales.

2.3 Fabricación de probetas

El material de estudio es el acero AISI / SAE 1018, por lo cual es necesario adquirir un eje de 44 mm (1 3/4 plg) de diámetro y una longitud de 750 mm. La Norma ASTM E18 [36] indica que, las probetas para realizar el ensayo de mediciones de dureza superficial deben presentar un área menor o igual a 2600 mm², es decir, un diámetro menor o igual a 57 mm (ver Anexo 3). Estos parámetros se muestran en la Tabla 9, donde además se indica que el espesor de las probetas debe estar entre 6 a 16 mm.

Tabla 9. Requerimientos dimensionales según la Norma ASTM E 18 – 19 [8].

Parámetro	Tolerancia
Espesor	$6.0 \text{ mm} \leq e \leq 16.0 \text{ mm}$
Área de prueba	$\leq 2600 \text{ mm}^2$
Rugosidad superficial	N3 – N5 ($\leq 0.4 \text{ } \mu\text{m}$)

El primer procedimiento es realizar el corte de secciones cilíndricas del eje de acero en una medida superior a 16 mm para después proceder con el mecanizado de las superficies donde se van a llevar a cabo las mediciones de dureza superficial. Para no alterar las propiedades mecánicas del acero debido a la fricción producida al realizar el corte, se utiliza una sierra de banda Stayer SN1490 (ver Anexo 4) que utiliza refrigerante en el procedimiento. En la Figura 16 se muestra la estructura de la sierra de banda utilizada, así como las secciones cortadas.



Figura 16. Corte de las secciones cilíndricas del eje de acero AISI / SAE 1018.
Elaborado por: Alex Jairo Méndez Curisaca

El diseño factorial debe considerar las medidas iniciales de dureza superficial del material base en el estado de suministro. Al haber determinado que se necesitan cuatro probetas por cada procedimiento de cementado, entonces también se van a requerir cuatro probetas del material base. Una vez se dispone de las secciones de material cortadas, es necesario mecanizar las superficies, para lo que se utiliza un torno EMCOMAT 17D, como el presentado en la Figura 17 (ver Anexo 5).

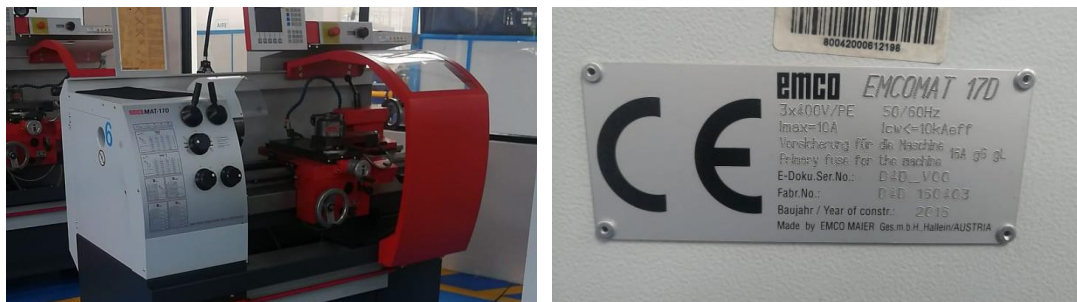


Figura 17. Torno Emco EMCOMAT 17D.
Elaborado por: Alex Jairo Méndez Curisaca

Las secciones de acero AISI / SAE 1018 deben presentar uniformidad en la superficie donde se van a realizar los ensayos de dureza. Para esto se requiere de un procedimiento de refrentado que se muestra en la Figura 18, procedimiento requerido para tener una base plana y estable, así como una superficie de medición uniforme.



Figura 18. Mecanizado de las probetas de acero AISI / SAE 1018.
Elaborado por: Alex Jairo Méndez Curisaca

En la Figura 19, se muestran las probetas para realizar los ensayos de dureza superficial, previamente cortadas y después de realizar el mecanizado en las superficies.



Figura 19. Probetas, antes y después del mecanizado.
Elaborado por: Alex Jairo Méndez Curisaca

2.4 Análisis del material base

El proveedor Böhler [22] brinda la información del acero ASI / SAE 1018 en la hoja técnica (ver Anexo 2). De igual manera, se conocen la composición química de este acero, valores de dureza superficial y la microestructura que presenta un acero de bajo carbono. A continuación, se indican las técnicas utilizadas para corroborar que el acero provisto es realmente acero AISI / SAE 1018.

2.4.1 Metalografía

El acero AISI / SAE 1018 es un acero que contiene hierro y de un 18 a 20 % de carbono en su composición. Entonces, esto puede evidenciar en su microestructura, como es

presentada en la Figura 20, donde la ferrita son las zonas claras y la perlita son las zonas oscurecidas [37].

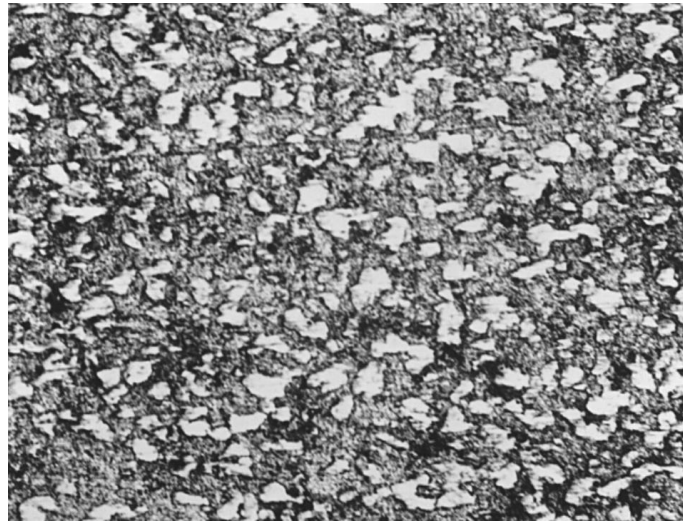


Figura 20. Metalografía del acero AISI / SAE 1018 a escala de 50 μm [37].

Para realizar el análisis metalográfico de un acero, se debe mecanizar una probeta con un área suficiente para visualizar su microestructura en un microscopio. La Figura 21 contiene el procedimiento de mecanizado, así como la probeta obtenida.



Figura 21. Mecanizado de la probeta para análisis metalográfico.
Elaborado por: Alex Jairo Méndez Curisaca

La probeta necesita ser pulida para poder apreciar claramente la microestructura del acero, para lo cual se van a utilizar diferentes equipos. En la Figura 22 se indica el proceso de pulido donde se utiliza diferentes lijas para desbastar, desde una lija 400 hasta una lija 2000, utilizando agua como lubricante y refrigerante. El procedimiento consiste en presionar la probeta sobre la superficie con la lija y deslizar hacia arriba, generando la fricción necesaria para producir el desbaste. El procedimiento es gradual

y se cambia el tamaño de grano de cada lija cuando ya no se evidencia desprendimiento de material.



Figura 22. Procedimiento de lijado en agua de la probeta.
Elaborado por: Alex Jairo Méndez Curisaca

Cuando la probeta esté prácticamente uniforme, sin presentar ninguna irregularidad en su superficie, se continúa con el pulido en una máquina pulidora de paño. La Figura 23 muestra la máquina y el procedimiento llevado a cabo hasta obtener una superficie pulida como espejo en la probeta.



Figura 23. Procedimiento de pulido en pulidora de paño.
Elaborado por: Alex Jairo Méndez Curisaca

Para poder visualizar la microestructura del acero, es necesario aplicarle un ataque químico, para lo cual se utiliza Nital 4 ASTM E407 [38]. El tiempo de exposición a esta sustancia química es de 30 segundos, después se realiza un lavado completo utilizando agua y posteriormente un secado al aire. La Figura 24 indica el Nital 4

utilizado para aceros de bajo contenido de carbono, así como la probeta después del ataque químico.



Figura 24. Nital 4 y ataque químico.
Elaborado por: Alex Jairo Méndez Curisaca

Tras haber realizado todo este procedimiento requerido para el análisis metalográfico, se utiliza un microscopio Micros Austria modelo MCXI700 [39] (ver Anexo 6). La Tabla 10 describe las características de este microscopio.

Tabla 10. Microscopio MCXI700 [39].

Parámetro	Descripción
Marca	Micros Austria
Modelo	MCXI700
Dimensiones	360 x 280 mm
Rango óptico	5x/0.12 – 50x/0.75
Lente	EWF 10x/22
Inclinación	5 a 35 °
Iluminación	Halógeno 6V30W

En la Figura 25, se muestra el procedimiento realizado en el microscopio, donde el enfoque debe realizarse girando la perilla de la derecha. Al realizar esta acción, la bandeja donde se coloca la probeta sube o disminuye su altura con respecto al lente.

Se utiliza la configuración de lentes de 20 x debido a que es la que presenta resultados más claros, logrando ver de manera adecuada la microestructura del acero.



Figura 25. Análisis con el microscopio MCXI700.
Elaborado por: Alex Jairo Méndez Curisaca

Mediante el software diseñado para el microscopio, al utilizar un lente de 20x, se puede visualizar la microestructura del AISI / SAE 1018 según la Figura 26. Es apreciable que la mayor área pertenece a ferrita y existen zonas pequeñas de perlita, que representan la baja presencia de carbono en el acero. Considerando este análisis, inicialmente se puede afirmar que el acero proporcionado por el proveedor corresponde al AISI / SAE 1018.

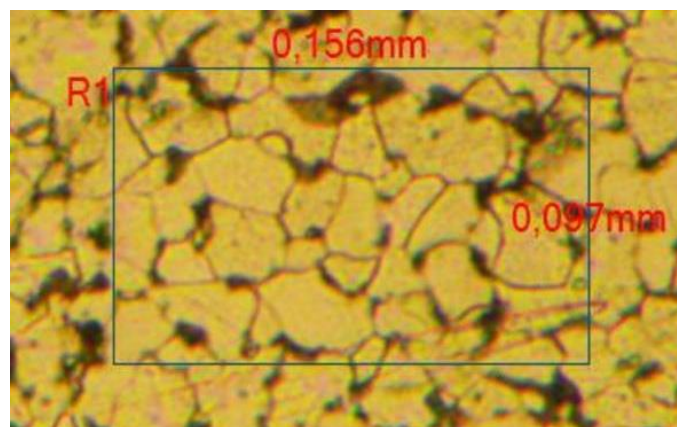


Figura 26. Microestructura del acero AISI / SAE 1018 a 20x.

Elaborado por: Alex Jairo Méndez Curisaca

2.4.2 Espectofotometría

Para la validación experimental del material proporcionado por el proveedor, es necesario definir las características principales del acero. Al tratarse de AISI / SAE 1018, el contenido de carbono es de aproximadamente 18 %. Para determinar este valor, es necesario utilizar un espectofotómetro Foundry-Master Xpert de la marca Oxford Instruments (ver Anexo 7) mostrado en la Figura 27.



Figura 27. Espectofotómetro Foundry-Master Xpert.
Elaborado por: Alex Jairo Méndez Curisaca

Mediante un análisis de espectofotometría se puede realizar un análisis de la composición de metales ferrosos y de aleaciones de aluminio, níquel y cobre. El equipo utiliza una emisión óptica espectroscopia que es controlada con un software [40]. La Tabla 11 contiene datos técnicos del espectofotómetro utilizado.

Tabla 11. Espectofotómetro Foundry-Master Xpert [40].

Parámetro	Descripción
Marca	Oxford Instruments
Modelo	Foundry-Master Xpert
Serie	52UI0016
Dimensiones (A x L x P)	380 x 740 x 880 mm
Potencia	600 W a 250 V / AC
Sistema de vacío	Bomba de vacío y CO ₂
Resolución óptica	13 pm/pixel
Longitud focal	350 mm
Longitud de onda	165 – 750 nm

La Figura 28 muestra el procedimiento para realizar la espectrofotometría. Las probetas de material base deben ser colocadas sobre el agujero del haz de luz y posteriormente colocar el electrodo para cerrar el circuito. El espectrofotómetro determina la cantidad de luz que atraviesa el material al realizar una quema, permitiendo así establecer la composición química del material en función de la transmitividad de cada elemento.

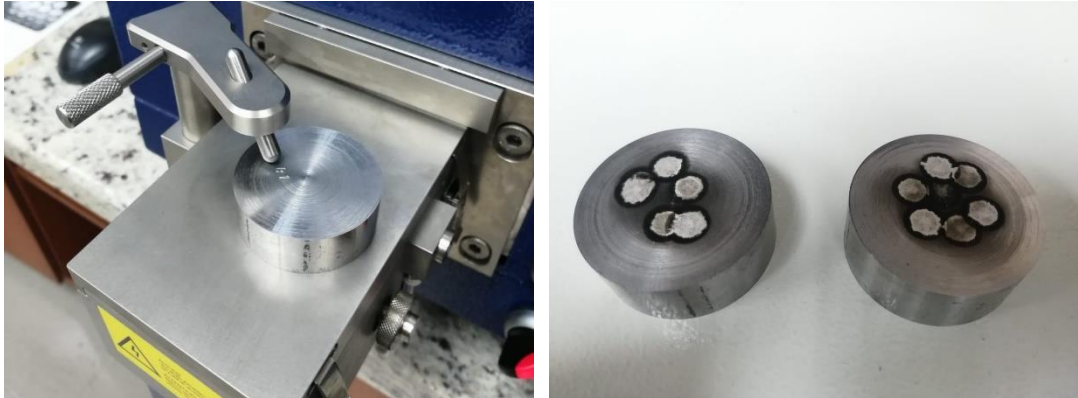


Figura 28. Ensayo de espectrofotometría.
Elaborado por: Alex Jairo Méndez Curisaca

Para utilizar el espectrofotómetro, es necesario utilizar el software Foundry Master Xline, donde se debe seleccionar el tipo de acero o material no ferroso por analizar. Para este caso, se escogió la opción de Aceros Bajos en Carbono y mediante el software es posible obtener los elementos químicos de la composición tabulados (ver Anexo 8). La Figura 29 evidencia este procedimiento.



Figura 29. Configuración del software para el espectrofotómetro.
Elaborado por: Alex Jairo Méndez Curisaca

Después de realizar el ensayo de espectrofotometría, el software arroja los resultados presentados en la Tabla 12. El porcentaje de carbono contenido por el acero es de 18 %, además de presentar un alto contenido de manganeso, superior al 60 %. Además, como indica el proveedor [12], este acero contiene cierta cantidad de impurezas de azufre y de fósforo, 5 y 4 %, respectivamente. Y este acero también puede llegar a presentar un contenido de silicio de hasta un 25 % [22]. De esta manera, se puede afirmar que el material base proporcionado por el proveedor, es acero AISI/SAE 1018, ya que se verifica que los elementos que lo componen corresponden al porcentaje indicado en la hoja técnica (ver Anexo 2).

Tabla 12. Resultados de la composición química del acero AISI / SAE 1018.

Elemento	C	Mn	Si	P	S
Porcentaje [%]	0.179	0.738	0.131	0.0233	0.0255

Elaborado por: Alex Jairo Méndez Curisaca

2.4.3 Dureza superficial

El ensayo de dureza superficial se desarrolla como indica la norma ASTM E18 – 19 [36], para lo cual es necesario definir las ubicaciones donde se van a realizar las mediciones. La Figura 30 ilustra las ubicaciones donde se deben tomar las medidas de dureza superficial, siendo necesario considerar el diámetro del indentador para definir los cuatro puntos circundantes alrededor de la medida central.

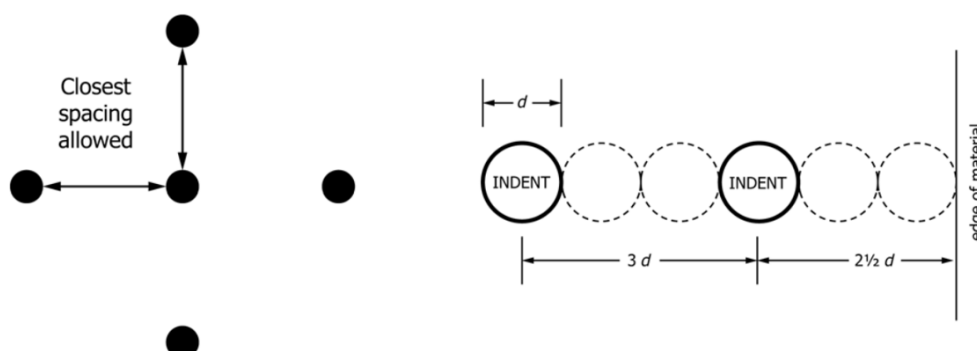


Figura 30. Ubicación para realizar las mediciones de dureza superficial [8].

Para tomar las mediciones de dureza superficial, se utiliza un durómetro Phase II de la marca Calright Instruments. En la Figura 31 se muestra el durómetro, instrumento utilizado para medir la dureza superficial de un acero. Es comúnmente utilizado por su exactitud y precisión, también es sencillo de operar [3].



Figura 31. Durómetro Phase II.
Elaborado por: Alex Jairo Méndez Curisaca

El durómetro cuenta con un indentador cónico con punta de diamante, así como la configuración de medidas HRA y HRC. La calibración del durómetro para realizar las mediciones es en HRC con una sobrecarga de 150 kgf. La Tabla 13 contiene los datos del durómetro utilizado.

Tabla 13. Durómetro Phase II [41].

Parámetro	Descripción
Marca	Phase II
Modelo	900 – 365
Carga	10 – 150 kgf
Duración de carga	2 – 50 s
Apreciación	0.1 HR
Escala	HRA, HRB, HRC, HRV

El certificado de calibración con fecha 19 de febrero del 2015 (ver Anexo 9), valida la utilización del durómetro para la medición de dureza superficial HRC al encontrarse dentro de los rangos definidos. La Figura 32 indica la medida de dureza superficial de un patrón de medida de baja dureza.



Figura 32. Medición de dureza superficial a un patrón de medida de baja dureza.
Elaborado por: Alex Jairo Méndez Curisaca

Según Böhler [22], el acero AISI / SAE 1018 puede ser sometidos a diferentes tratamientos térmicos para incrementar su resistencia y dureza. Después del cementado contemplado dentro de las temperaturas indicadas, la dureza superficial es de alrededor de 60 HRC. En la Figura 33 se puede evidenciar que el durómetro brinda mediciones muy cercanas a las establecidas en los patrones de medición de alta dureza.



Figura 33. Medición de dureza superficial a un patrón de medida de alta dureza.
Elaborado por: Alex Jairo Méndez Curisaca

En la Figura 34, se presenta la medición de dureza superficial tomada con el durómetro, así como las marcas del indentador en la probeta de material base. El proveedor [20] indica que el acero AISI / SAE debe tener una dureza máxima de 8 HRC, sin embargo, el durómetro no logra determinar esta medición. Por este motivo, se realiza la configuración para realizar medidas de dureza HRA en el durómetro y obtener una equivalencia de dureza máxima de 54 HRA.



Figura 34. Medición de dureza superficial del material base.
Elaborado por: Alex Jairo Méndez Curisaca

Los valores obtenidos de las mediciones de dureza, en promedio estuvieron en 53.5 HRA como se indica en la Figura 35, con una equivalencia de 7 HRC, valor indicado para el AISI / SAE 1018 suministro por el proveedor (ver Anexo 1). De esta manera, se puede ratificar que el material de suministro es acero AISI / SAE 1018 y es viable la realización de los tratamientos térmicos en las probetas.



Figura 35. Dureza superficial del material base en HRA.
Elaborado por: Alex Jairo Méndez Curisaca

2.5 Cementado

Para realizar el tratamiento termoquímico de cementado, se requiere colocar el acero de bajo carbono en un contenedor cerrado con su interior lleno de carbón. En la Figura 36 se muestran las cajas para cementado, así como el carbón utilizado para este procedimiento. Se debe calentar las probetas de acero hasta la temperatura de austenización para que absorban el monóxido de carbono emanado por el carbón y así aumentar su zona de perlita.

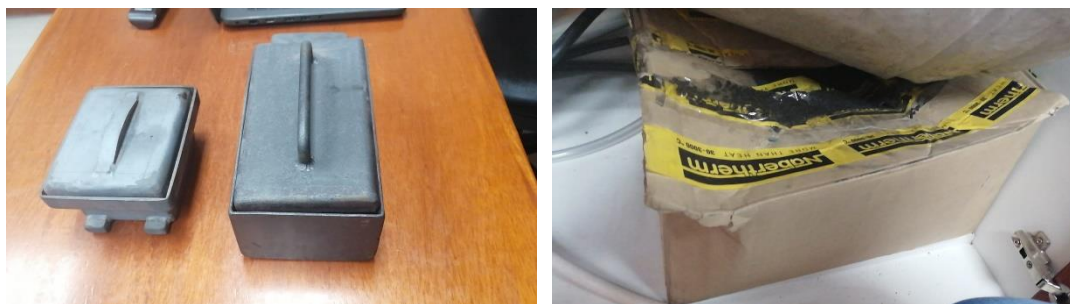


Figura 36. Cajas y carbón para cementado.
Elaborado por: Alex Jairo Méndez Curisaca

La Figura 37 presenta el horno utilizado para este tratamiento termoquímico de cementado de la marca Nabertherm modelo N7 / H (ver Anexo 10).



Figura 37. Horno de tratamientos térmicos N7 / H.
Elaborado por: Alex Jairo Méndez Curisaca

El procedimiento consiste en colocar las probetas dentro de la caja de cementado y cubrir toda su superficie con carbón. Luego se coloca una tapa en la caja de cementado y se inserta en el horno de tratamientos térmicos para elevar la temperatura hasta el punto de austenización del acero. Se realizaron cuatro procedimientos de cementado diferentes, variando la temperatura y el tiempo de cementado, de 6 y 8 horas, así como a 880 y 950 °C. La Tabla 14 presenta el procedimiento a realizarse en cada probeta. Como se especifica previamente, se considera cuatro variables para la realización de esta investigación, la temperatura y tiempo de cementado, así como las temperaturas de temple y revenido.

Tabla 14. Orden de las probetas con relación a los tratamientos térmicos.

Tratamiento		Temperaturas y probetas			
Cementado		880 °C		950 °C	
		6 h	8 h	6 h	8 h
		P3	P1	P4	P2
		P6	P5	P7	P13
		P11	P8	P10	P14
		P12	P9	P16	P15
Templado		770 °C		800 °C	
		P1	P2	P8	P10
		P3	P4	P9	P14
		P5	P7	P11	P15
		P6	P13	P12	P16

	150 °C		200 °C	
Revenido	P1	P8	P5	P9
	P2	P10	P6	P12
	P3	P11	P7	P15
	P4	P14	P13	P16

Elaborado por: Alex Jairo Méndez Curisaca

2.6 Templado

Un acero se tiempla para aumentar su dureza superficial, procedimiento que se obtiene al calentar el acero hasta su temperatura de austenización para luego enfriarlo rápidamente. En la Tabla 15 se muestran las especificaciones técnicas del mismo horno utilizado.

Tabla 15. Horno N7 / H [8].

Parámetro	Descripción
Marca	Nabertherm
Modelo	N7 / H
Temperatura máxima	1280 °C
Potencia	3 kW
Dimensiones de la cámara	250 x 250 x 120 mm
Volumen de la cámara	7 L

El aceite utilizado para el enfriamiento es Durixol W 25 (ver Anexo 11), un aceite diseñado específicamente para tratamientos térmicos. Este aceite tiene una eficiencia de enfriamiento elevada por su resistencia a evaporarse [43]. En la Figura 38 se muestra el aceite que se utiliza para el temple de las probetas.

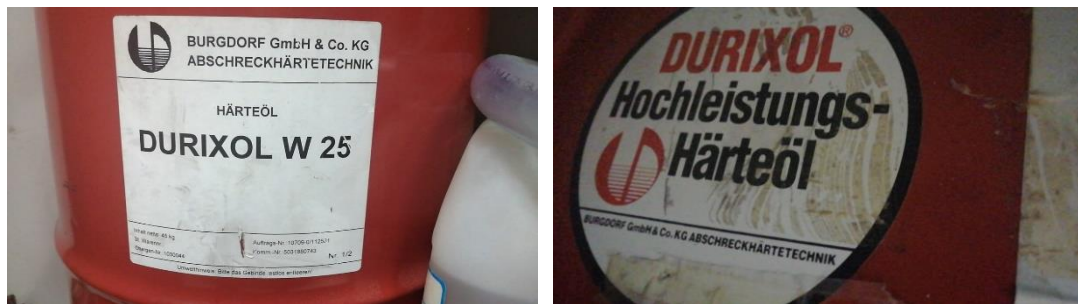


Figura 38. Aceite Durixol W25.
Elaborado por: Alex Jairo Méndez Curisaca

2.7 Revenido

El revenido es un tratamiento térmico aplicado a aceros para mejorar sus propiedades mecánicas al calentarlo a temperaturas más bajas que la de fusión durante períodos de tiempo prolongados. El propósito de este tratamiento térmico es disminuir la fragilidad del acero al reducir las tensiones internas [16]. El horno utilizado para este tratamiento térmico es el Nabertherm N15 / 65 HA (ver Anexo 12), como el que se presenta en la Figura 39.



Figura 39. Horno para revenido Nabertherm N15 / 65 HA.
 Elaborado por: Alex Jairo Méndez Curisaca

CAPÍTULO III

DESARROLLO EXPERIMENTAL DE LOS TRATAMIENTOS TÉRMICOS

En este capítulo, se presentan los diferentes procedimientos realizados en el desarrollo experimental del tratamiento termoquímico de cementado, después el templado y revenido, describiendo los parámetros utilizados, así como cada acción realizada en cada uno de ellos.

3.1 Procedimiento experimental de cementado

Se realizaron cuatro tratamientos térmicos diferentes de cementado, considerando temperaturas de 880 y 950 °C durante 6 y 8 horas, utilizando un diseño factorial para obtener el número de probetas requeridas en función de los parámetros y niveles planteados. El horno se precalienta a 400 °C y luego se introdujo la caja de cementado con las probetas, cuando se alcanza cada una de las temperaturas definidas, se mantuvo durante el tiempo requerido. La Figura 40 indica el funcionamiento del horno de tratamientos térmicos, así como el proceso de calentamiento hasta las temperaturas establecidas.

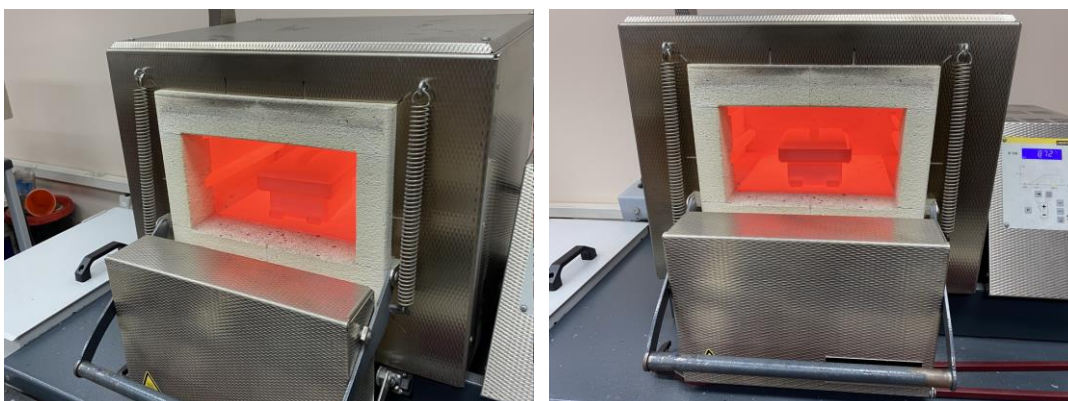














Figura 40. Procedimiento experimental de cementado.
Elaborado por: Alex Jairo Méndez Curisaca

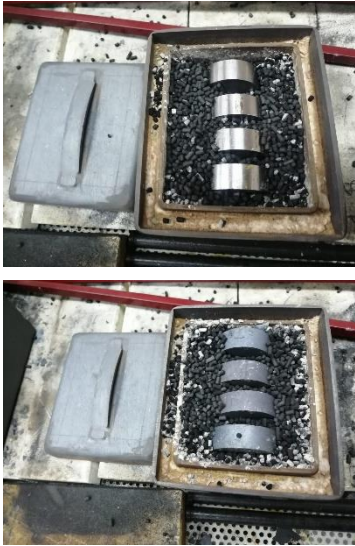

En la Tabla 16 se muestra el procedimiento experimental de cementado, donde se coloca las probetas en la caja de cementado cubiertas con carbón, se introdujo en el horno y se deja enfriar en el contenedor.

Tabla 16. Procedimiento experimental de cementado.

Parámetros	Procedimiento	
T = 880 °C t = 6 h		
		
T = 880 °C t = 8 h		
		
T = 950 °C t = 6 h		
		

Elaborado por: Alex Jairo Méndez Curisaca

Tabla 16. Procedimiento experimental de cementado. (Continuación).

Parámetros	Procedimiento	
T = 950 °C t = 8 h		

Elaborado por: Alex Jairo Méndez Curisaca

3.2 Procedimiento experimental de templado

Se realizaron dos tratamientos térmicos diferentes, en función del rango de temperaturas indicado para el acero AISI / SAE 1018, 770 y 800 °C. Después del tiempo de calentamiento de las probetas, se las sumerge en aceite. En la Figura 41, se muestra el procedimiento experimental previo al templado, cargado aceite en el contenedor y colocando las probetas a ser calentadas.



Figura 41. Preparación para el tratamiento térmico de temple.
Elaborado por: Alex Jairo Méndez Curisaca

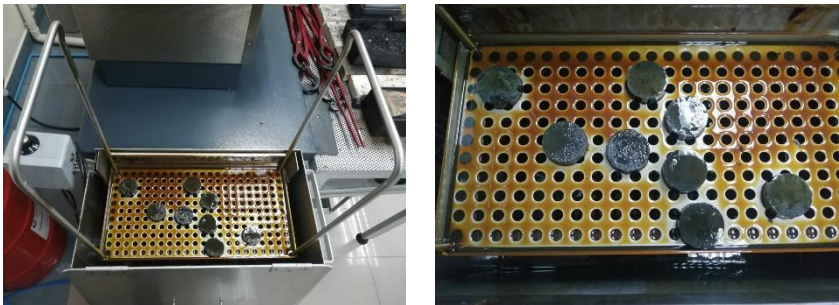
La Tabla 17 resume el procedimiento realizado en el tratamiento térmico de temple, donde se configura el horno para que se mantenga a 770 °C durante

una hora para el primer grupo de probetas. Después se introdujo las probetas cementadas previamente al horno y después del transcurso del tiempo configurado se las enfría rápidamente sumergiéndolas en el contenedor de aceite. Se debe repetir este procedimiento con el segundo grupo de probetas, a una temperatura de 800 °C por una hora.

Tabla 17. Procedimiento experimental de cementado.

Descripción	Procedimiento	
Colocar las probetas en un contenedor e introducirlas.		
Retirar el contenedor al abrir la puerta y utilizar las pinzas.		
Colocar las probetas en la bandeja.		
Sumergir las probetas en el aceite y agitar la bandeja por dos minutos.		

Tabla 17. Procedimiento experimental de cementado. (Continuación).

Descripción	Procedimiento
Retirar las probetas del aceite y limpiarlas.	

Elaborado por: Alex Jairo Méndez Curisaca

3.3 Procedimiento experimental de revenido

Se realizaron dos tratamientos térmicos de revenido diferentes durante 2 horas de acuerdo al grupo de probetas por analizar. Para el primer grupo de probetas, se configura una temperatura de 150 °C, mientras que la temperatura es de 200 °C para el segundo grupo de probetas. La Figura 42 evidencia este procedimiento.

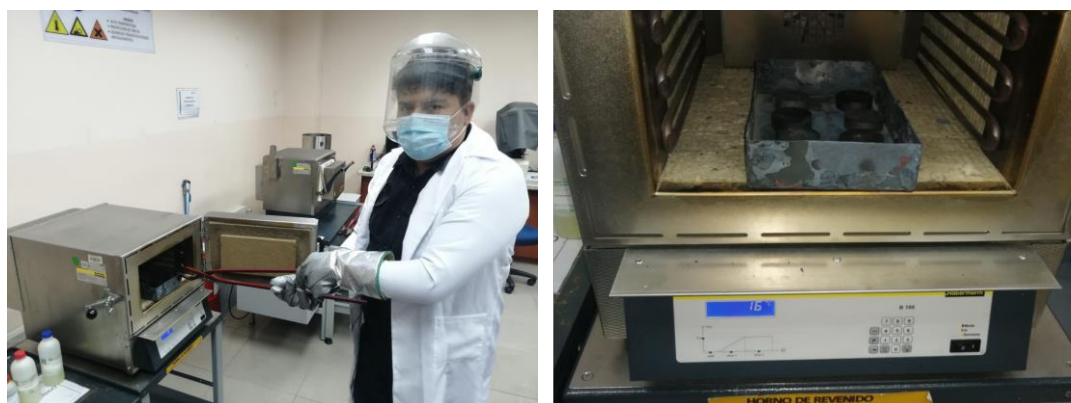


Figura 42. Procedimiento experimental de revenido.
Elaborado por: Alex Jairo Méndez Curisaca

CAPÍTULO IV

ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS

El Capítulo IV ha partido de las medidas obtenidas experimentalmente para desarrollar un análisis de varianza ANOVA, de esta manera, determinar si la matriz establecida tiene una distribución normal con respecto al número de probetas y medidas realizadas. Realizados los ensayos experimentales, tanto del proceso de cementado, temple y revenido, se procede a medir la dureza para determinar cómo influyen los parámetros seleccionados.

4.1 Resultados de ensayos de dureza

La Tabla 18 contiene los datos de dureza medidos después de cada ensayo en donde se muestran las cinco medidas realizadas, así como su promedio

Tabla 18. Medidas experimentales de dureza superficial en las probetas.

Probeta	Medida 1 [HRC]	Medida 2 [HRC]	Medida 3 [HRC]	Medida 4 [HRC]	Medida 5 [HRC]	Promedio o [HRC]
1	52.5	53.3	50.5	52.5	54.5	52.7
2	59.9	59.7	59.3	59.0	58.8	59.3
3	48.0	50.3	49.6	47.4	48.4	48.7
4	55.5	56.1	54.8	55.8	56.3	55.7
5	50.7	51.3	50.3	50.3	51.6	50.9
6	47.0	45.9	45.5	47.6	46.1	46.4
7	52.3	53.7	51.9	53.3	50.5	52.3
8	56.9	55.6	57.2	56.5	58.1	56.9
9	51.5	51.0	51.7	50.7	52.4	51.4
10	58.2	57.7	58.3	58.2	57.6	58.0
11	50.4	51.2	52.5	49.7	53.4	51.4
12	47.1	47.9	50.4	50.5	47.3	48.6
13	55.8	55.3	55.8	55.3	55.4	55.5
14	61.1	61.2	60.0	62.3	60.0	60.9
15	58.7	58.7	59.4	59.1	59.3	59.0
16	55.7	56.1	55.0	56.1	56.2	55.8

Elaborado por: Alex Jairo Méndez Curisaca

La gráfica de serie de tiempo de la dureza superficial presentada en la Figura 43 muestra los diferentes ensayos ejecutados en función a la dureza obtenida. Se observa que existen variaciones entre cada uno de los ensayos, lo que indica que los parámetros seleccionados para el ensayo hacen que la variable de salida, dureza superficial, vaya cambiando con los diferentes factores y niveles utilizados. Se obtienen las mayores durezas con el mayor tiempo y temperatura de cementado, así como las menores durezas con el caso contrario.

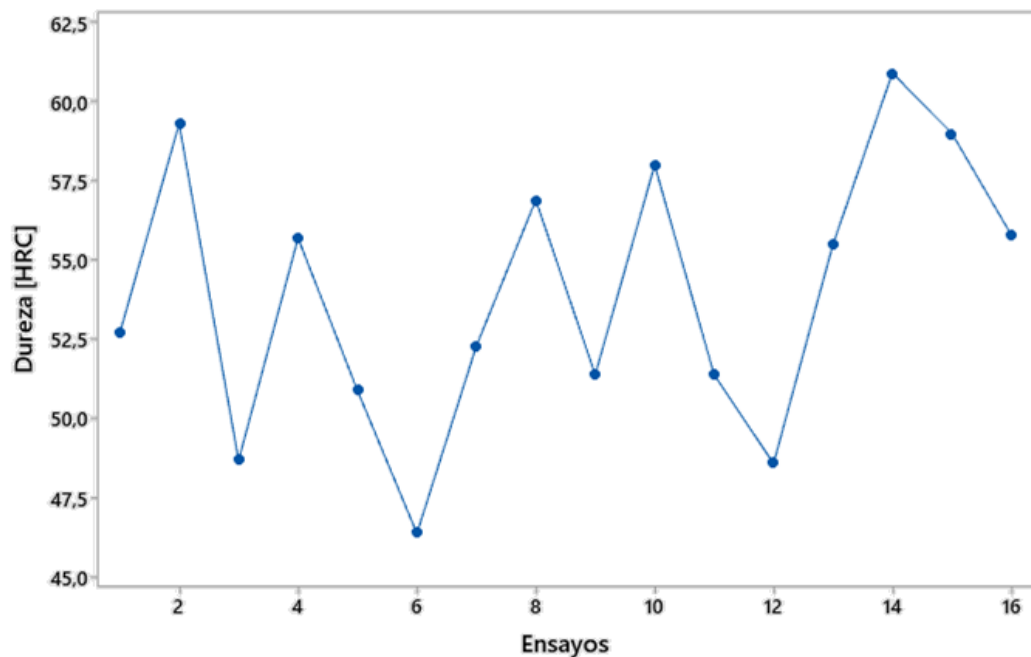


Figura 43. Serie de tiempo de la dureza superficial de las probetas.
Elaborado por: Alex Jairo Méndez Curisaca

4.2 Validación de datos experimentales obtenidos

Luego de haber llevado a cabo el experimento, se realiza la medición de la dureza superficial para cada ensayo y luego es importante realizar la validación de los datos obtenidos. Para ello, se ejecuta una prueba de normalidad con un software especializado, como se muestra en la Figura 44, donde se evalúa el ajuste de la distribución de los datos hacia una curva de distribución normal, con lo que se garantiza que los datos obtenidos son tomados de una manera adecuada. Para el análisis de normalidad de los datos obtenidos de dureza, se ejecuta la prueba con un 95 % de índice de confianza, teniendo una alta probabilidad de que los datos reales obtenidos están siguiendo una distribución normal.

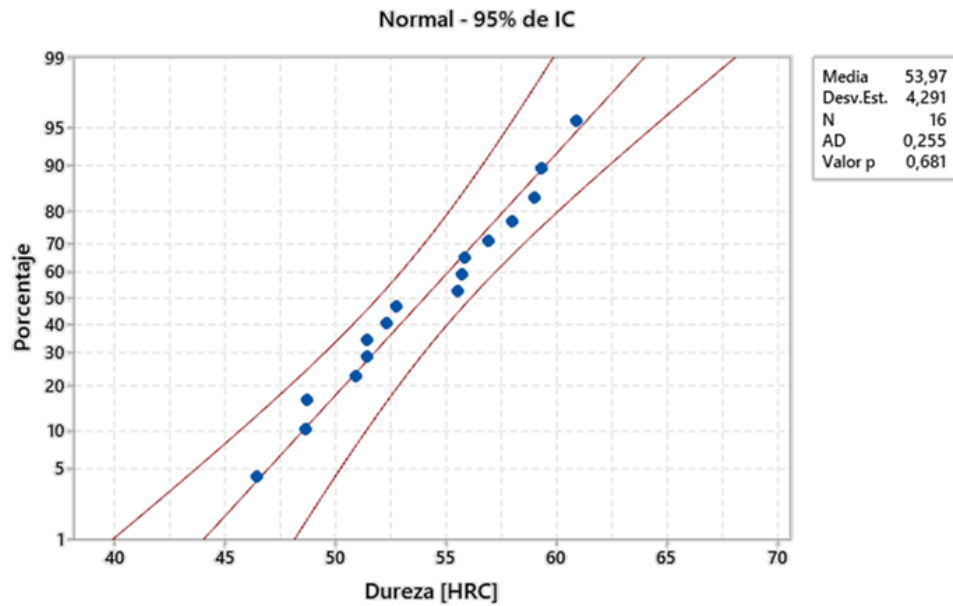


Figura 44. Probabilidad de la dureza superficial de las probetas.
Elaborado por: Alex Jairo Méndez Curisaca

De los datos de dureza medidos, se obtuvo una media de 53.97 HRC, una desviación estándar de 4.291 HRC y de la prueba de normalidad se tuvo un coeficiente de Anderson Darling AD de 0.255, así como un valor de probabilidad (p) de 0.681. Este valor de probabilidad es el de mayor nivel de significancia, 0.05, además se puede observar que los datos analizados se encuentran entre las líneas del intervalo de confianza. Luego de analizar estos valores, se puede afirmar que los datos de dureza obtenidos del experimento provienen de una distribución normal, con lo cual quedan validados para su uso.

4.3 Análisis ANOVA

Para el análisis de los datos de dureza obtenidos con cada uno de los ensayos, se utiliza la técnica de Análisis de Varianza (ANOVA). Esta técnica es utilizada para analizar la variabilidad de cada uno de los datos a través del cálculo de la varianza de los mismos. El propósito de este análisis es conocer los parámetros que influyen durante el procedimiento experimental y así obtener la mayor dureza superficial. En la Tabla 19, se indica cada uno de los niveles y factores utilizados en los ensayos, así como el promedio de la dureza obtenida. Esta información es utilizada para realizar el análisis estadístico ANOVA en el software especializado MINITAB.

Tabla 19. Niveles y factores utilizados en el procedimiento experimental.

Probeta	Tiempo de cementado [h]	Temperatura de cementado [°C]	Temperatura de templado [°C]	Temperatura de revenido [°C]	Dureza [HRC]
1	8	880	770	150	52,7
2	8	950	800	200	59,3
3	6	880	800	200	48,7
4	6	950	800	200	55,7
5	8	880	800	150	50,9
6	6	880	800	150	46,4
7	6	950	770	150	52,3
8	8	880	800	200	56,9
9	8	880	770	200	51,4
10	6	950	800	150	58,0
11	6	880	770	200	51,4
12	6	880	770	150	48,6
13	8	950	800	150	55,5
14	8	950	770	150	60,9
15	8	950	770	200	59,0
16	6	950	770	200	55,8

Elaborado por: Alex Jairo Méndez Curisaca

En el cálculo del análisis de varianza, se utiliza diferentes parámetros o variables, motivo por el que se ha presentado una definición de éstos, información que la Tabla 20 contiene.

Tabla 20. Terminología para análisis de varianza.

Parámetros ANOVA	
<i>C.F.</i> : Factor de Corrección	V Varianza (Promedio de raíces)
<i>GL</i> : Grados de libertad	<i>SC</i> : Suma de cuadrados
<i>GL_e</i> : Error grados de libertad del error	<i>n</i> : Número de experimentos
<i>GL_t</i> : Grados de libertad total	<i>GL_f</i> : Grados de libertad para factores
<i>r</i> : Número de repeticiones	<i>e</i> : Error
<i>S</i> : Suma pura de cuadrados	<i>V</i> : Relación de varianza
<i>t</i> : Total de resultados	<i>%P</i> : Porcentaje de influencia

Elaborado por: Alex Jairo Méndez Curisaca

4.4 Cálculo de expresiones ANOVA

Una vez que se conoce los diferentes términos, es posible calcular los grados de libertad de todo el análisis, así como la varianza, los errores, el estadístico de Fisher y la influencia de cada factor sobre la dureza superficial. A continuación, se detallan los diferentes cálculos para ejecutar un análisis ANOVA.

4.4.1 Grados de libertad

Grados de libertad totales:

$$GL_t = \text{Número de Pruebas} - 1 \quad (1)$$

$$GL_t = 16 - 1$$

$$GL_t = 15$$

Grados de libertad para los factores:

$$GL_f = \text{Número de niveles} - 1 \quad (2)$$

$$GL_f = 2 - 1$$

$$GL_f = 1$$

Grados de libertad para el error:

$$GL_e = GL_t - GL_f \quad (3)$$

$$GL_e = 15 - (1 * 4)$$

$$GL_e = 11$$

4.4.2 Suma de cuadrados totales

$$SCt = SC - CV \quad (4)$$

$$SCt = \sum_{i=1}^n yi^2 - \left(\frac{1}{n}\right) \cdot \left[\sum_{i=1}^n yi\right]^2 \quad (5)$$

SCt

$$= (52.7^2 + 59.3^2 + 48.7^2 + 55.7^2 + 50.9^2 + 46.4^2 + 52.3^2 + 56.9^2 + 51.4^2 + 58.0^2 + 51.4^2 + 48.6^2 + 55.5^2 + 60.9 + 59.0^2 + 55.8^2)$$

$$- \frac{\left(\begin{array}{c} 52.7 + 59.3 + 48.7 + 55.7 + 50.9 + 46.4 + 52.3 + 56.9 + 51.4 + 58.0 \\ + 51.4 + 48.6 + 55.5 + 60.9 + 59.0 + 55.8 \end{array} \right)^2}{16}$$

$$SCt = 276.19$$

4.4.3 Varianza

$$VSC = \sum_{K=1}^L \left(\frac{1}{n}\right) \cdot \left[\sum_{i=1}^n (AKi)\right]^2 - CV \quad (6)$$

-Tiempo de Cementado

$$VSC = \frac{(48.7 + 55.7 + 46.4 + 52.3 + 58.0 + 51.4 + 48.6 + 55.8)^2}{8} + \frac{(52.7 + 59.3 + 50.9 + 56.9 + 51.4 + 55.5 + 60.9 + 59.0)^2}{8} - 46602.02$$

$$VSC = 55.13$$

-Temperatura de Cementado

$$VSC = \frac{(52.7 + 48.7 + 50.9 + 46.4 + 56.9 + 51.4 + 51.4 + 48.6)^2}{8} + \frac{(59.3 + 55.7 + 52.3 + 58.0 + 55.5 + 60.9 + 59.0 + 55.8)^2}{8} - 46602.02$$

$$VSC = 153.14$$

-Temperatura de Temple

$$VSC = \frac{(52.7 + 52.3 + 51.4 + 51.4 + 48.6 + 60.9 + 59.0 + 55.8)^2}{8} + \frac{(59.3 + 48.7 + 55.7 + 50.9 + 46.4 + 56.9 + 58.0 + 55.5)^2}{8} - 46602.02$$

$$VSC = 0.031$$

-Temperatura de Revenido

$$VSC = \frac{(52.7 + 50.9 + 46.4 + 52.3 + 58.0 + 48.6 + 55.5 + 60.9)^2}{8} \\ + \frac{(59.3 + 48.7 + 55.7 + 56.9 + 51.4 + 51.4 + 59.0 + 55.8)^2}{8} \\ - 46602.02$$

$$VSC = 10.40$$

4.4.4 Varianza para cada Factor

$$V_f = \frac{VSC}{GL_f} \quad \text{ecuación (7)}$$

-Tiempo de Cementado

$$V_f = \frac{55.13}{1} \\ V_f = 55.13$$

-Temperatura de Cementado

$$V_f = \frac{153.14}{1} \\ V_f = 153.14$$

-Temperatura de Temple

$$V_f = \frac{0.031}{1} \\ V_f = 0.031$$

-Temperatura de Revenido

$$V_f = \frac{10.40}{1} \\ V_f = 10.40$$

4.4.5 Cálculo del error

$$e = SCT - \left(\sum vsc \right) \quad \text{ecuación (8)} \\ e = 276.19 - (55.13 + 153.14 + 0.031 + 10.40) \\ e = 57.49$$

4.4.6 Cálculo del error de la varianza

$$VSCe = \frac{e}{GL_e} = \frac{57.49}{11}$$

$$VSCe = 5.23$$

4.4.7 Cálculo de la razón de varianza o prueba F

$$F = \frac{V_f}{VSCe}$$

-Tiempo de Cementado

$$F = \frac{55.13}{5.23}$$

$$F = 10.55$$

-Temperatura de Cementado

$$F = \frac{153.14}{5.23}$$

$$F = 29.30$$

-Temperatura de Temple

$$F = \frac{0.031}{5.23}$$

$$F = 0.01$$

-Temperatura de Revenido

$$F = \frac{10.40}{5.23}$$

$$F = 1.99$$

4.4.8 Influencia de los factores sobre la respuesta

$$\%P = V_f \cdot \frac{1}{SCt} \cdot 100$$

-Tiempo de Cementado

$$\%P = 55.13 \cdot \frac{1}{276.19} \cdot 100$$

$$\%P = 19.96 \%$$

-Temperatura de Cementado

$$\%P = 153.14 \cdot \frac{1}{276.19} \cdot 100$$

$$\%P = 55.45 \%$$

-Temperatura de Temple

$$\%P = 0.031 \cdot \frac{1}{276.19} \cdot 100$$

$$\%P = 0.01 \%$$

-Temperatura de Revenido.

$$\%P = 10.40 \cdot \frac{1}{276.19} \cdot 100$$

$$\%P = 3.77 \%$$

4.5 Resumen del análisis ANOVA

Después del desarrollo de cálculo ANOVA, se determina la razón de varianza, conocida como prueba de Fisher. Se obtuvo que el parámetro que más influye sobre la dureza superficial es la temperatura de cementado con un valor F de 29.30, o con una influencia del 55.45 %. La segunda variable de mayor importancia es del tiempo de cementado con un valor F de 10.55, con una influencia de 19.96%. Adicionalmente, se conoce que, tanto la temperatura para temple, así como la de revenido, tienen una presencia insignificante, ya que tienen menos del 5 % de influencia sobre la dureza obtenida en el ensayo. La Tabla 21 resume el análisis de varianza ejecutado.

Tabla 21. Resumen del análisis de varianza con los datos de dureza superficial.

FUENTE	GL	S	V	Valor F	% I
Tiempo de cementado (h)	1	55.13	55.13	10.55	19.96
Temperatura de cementado (°C)	1	153.14	153.14	29.30	55.45
Temperatura de Templado (°C)	1	0.031	0.031	0.01	0.01
Temperatura de Revenido (°C)	1	10.40	10.40	1.99	3.77
Error	11	57.49	5.23		
GL_t Total	15				

Elaborado por: Alex Jairo Méndez Curisaca

4.6 Validación análisis de varianza ANOVA

Al realizar el cálculo manual del análisis de varianza ANOVA, se logra validar el modelo con un software estadístico especializado. De esta manera, las respuestas obtenidas son iguales a las obtenidas mediante el cálculo de manera manual, con lo que se ratifica que el procedimiento empleado se encuentra dispuesto de una manera correcta. Adicional, se encuentra el valor p , que es una probabilidad y que permite medir la influencia de la variable sobre la respuesta. El valor p más bajo indica que se tiene una mayor influencia sobre la respuesta, así como el mayor valor indica lo contrario. Al analizar la Figura 45, se ratifica que la temperatura de cementado y el tiempo de cementado son los factores que tienen influencia sobre la dureza superficial.

Análisis de Varianza

Fuente	GL	SC	Ajust. MC	Ajust. Valor F	Valor p
Modelo	4	218,702	54,676	10,46	0,001
Lineal	4	218,702	54,676	10,46	0,001
Tiempo de cementado [h]	1	55,131	55,131	10,55	0,008
Temperatura de cementado [°C]	1	153,141	153,141	29,30	0,000
Temperatura de templado [°C]	1	0,031	0,031	0,01	0,940
Temperatura de revenido [°C]	1	10,401	10,401	1,99	0,186
Error	11	57,492	5,227		
Total	15	276,194			

Figura 45. Análisis de varianza utilizando MINITAB.
Elaborado por: Alex Jairo Méndez Curisaca

4.7 Efectos principales e interacciones de parámetros

La gráfica de efectos principales permite conocer las diferencias que existe entre las medias de cada uno de los factores analizados. Estas variables son el tiempo de cementado, la temperatura de cementado, la temperatura de templado, la temperatura de revenido. Existe un efecto principal, cuando se tiene diferentes niveles de un factor que afectan a la respuesta que se tiene de una manera diferente. En la Figura 46, se observa de una manera clara las diferencias significativas entre la temperatura de cementado y en el tiempo de cementado. Por lo que se considera a estos factores como efectos principales. Mientras que, para la temperatura de templado y para la temperatura de revenido no se tiene esta diferencia significativa, entonces no se considera como efecto principal.

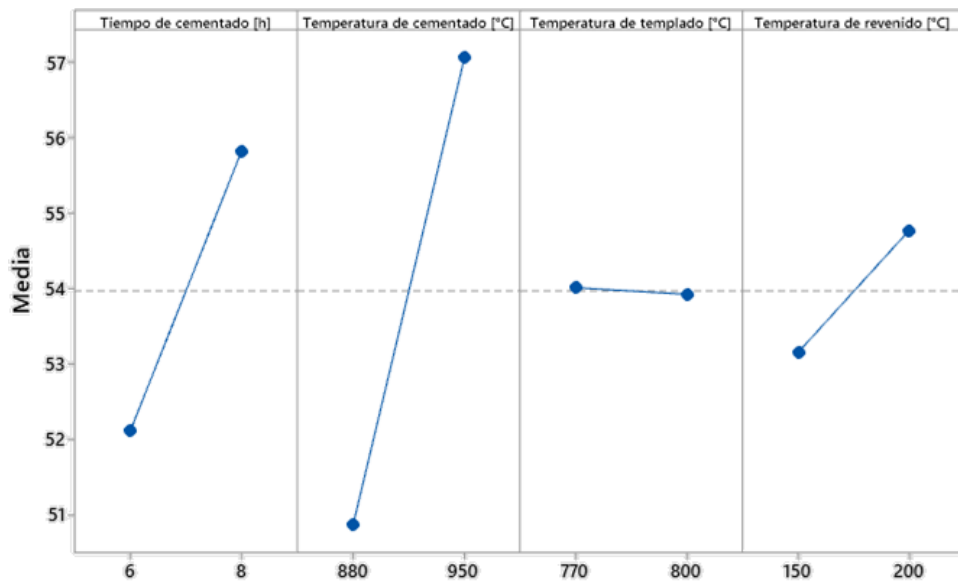


Figura 46. Efectos principales para dureza superficial.
Elaborado por: Alex Jairo Méndez Curisaca

4.8 Diagrama de Pareto

El diagrama de Pareto de efectos estandarizados indica los valores absolutos de la influencia de los efectos sobre la variable de salida. La línea de referencia se establece para lograr determinar el nivel de significancia, este nivel de significancia es 1 restado el nivel de confianza del análisis. En la Figura 47, después de establecer la línea de referencia, se puede indicar que la temperatura de cementado, como el tiempo de cementado cruzan la línea lo que significa que son estadísticamente significativos. Por otra parte, la temperatura de templado y la temperatura de revenido no pasan la línea que representa el nivel de significancia, por lo cual son factores que no son estadísticamente significativos.

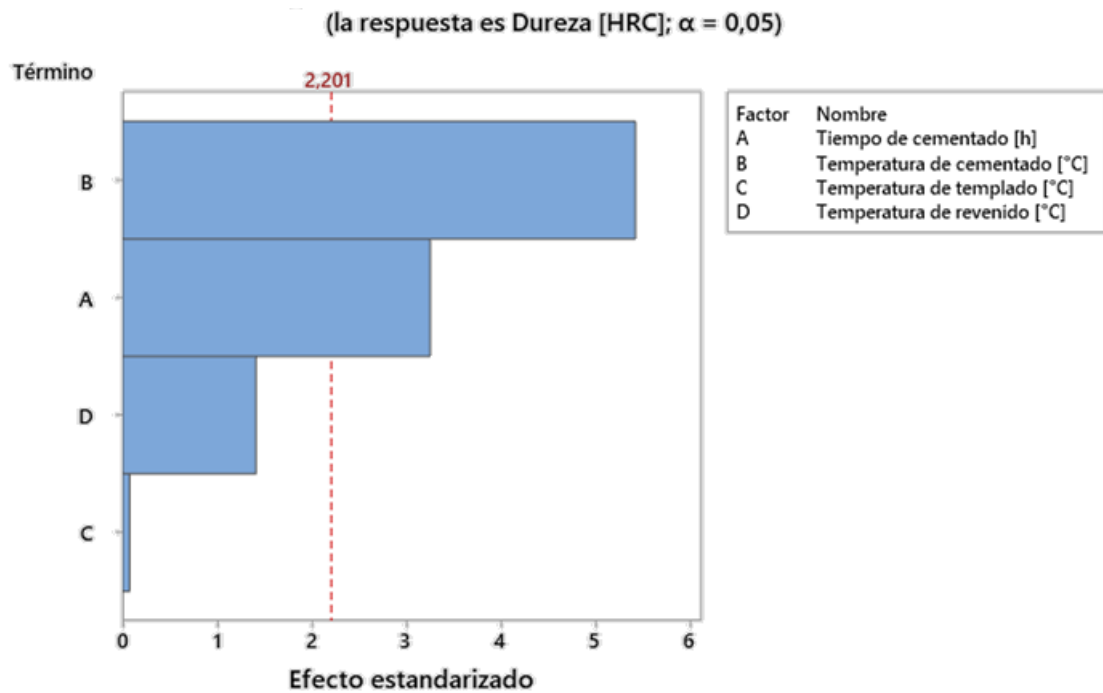


Figura 47. Diagrama de Pareto de efectos estandarizados.

Elaborado por: Alex Jairo Méndez Curisaca

4.9 Análisis económico del Proyecto de Investigación

El costo de los materiales, procedimientos e insumos requeridos para realizar experimentalmente el cementado del AISI / SAE 1018 se presentan en la Tabla 22. Es importante mencionar que, los tratamientos térmicos, las medidas de dureza superficial, el análisis metalográfico y químico del material, se ha realizado en la Universidad Politécnica Salesiana. Se ha utilizado los equipos e instrumentos del Laboratorio de Metalografía, sin embargo, se han presentado costos referenciales del mercado nacional para aproximar un costo total de USD 1085.

Tabla 22. Descripción y costo de los materiales comprados y servicios profesionales.

Concepto	Cantidad	Costo unitario [USD]	Costo total [USD]
Acero AISI / SAE 1018 Ø 2 plg	2 m	25.00	25.00
Fabricación de probetas	20 u	10.00	200.00
Tratamientos térmicos	16 u	20.00	320.00
Imprevistos fuera de la UPS	1 u	200.00	200.00
Medición de dureza	20 u	10.00	200.00
Análisis metalográfico	2 u	15.00	30.00
Análisis químico del material	1 u	50.00	50.00
Impresiones Libros	200 u	0.05	10.00
Tutorías extra	1 u	50.00	50.00
		TOTAL	1085.00

Elaborado por: Alex Jairo Méndez Curisaca

Con el cementado, un tratamiento termoquímico, se ha podido aumentar la dureza superficial del acero base. El estudio ejecutado permite identificar diferentes factores y así conocer la dureza que puede alcanzar al hacer uso de éstos. Por este motivo, los resultados obtenidos pueden ser utilizados para ejecutar prácticas de Laboratorio en la Universidad Politécnica Salesiana y además considerar su aplicación práctica en la industria. Dada la utilidad de los datos obtenidos, el costo del proyecto de investigación se ve justificado.

CONCLUSIONES

El tratamiento termoquímico de cementado en el acero AISI/SAE 1018 es conocido como carburización y consiste en incrementar el contenido de carbono en un acero de bajo contenido de este elemento. Para ello, las probetas deben ser calentadas para sobrepasar la temperatura de austenización de hasta 950 °C durante un tiempo de 8 horas y la atmósfera que se crea en el contenedor que está herméticamente sellado permite que el carbono se adhiera al acero. Para incrementar la dureza superficial, el acero se calienta 50 °C sobre la temperatura de austenización y es enfriado súbitamente en aceite térmico y mediante un revenido se alivian las tensiones internas, con lo que se puede llegar a tener un valor de 62 HRC.

Los rangos de temperatura son seleccionados del catálogo de Böhler [22], por lo que el cementado se realiza a dos temperaturas, 880 y 950 °C durante 6 y 8 horas para cada temperatura. Las probetas se dejaron enfriar en el interior del horno durante 48 horas y luego son templadas a 770 y 800 °C para finalmente utilizar el revenido a temperaturas de 150 y 200 °C, aliviando así las tensiones internas del acero. El número de probetas es obtenido utilizando el software MINITAB en función de los niveles y factores, tanto tiempo como temperaturas.

El promedio de durezas del material base es de 53.7 HRA, equivalente a 7 HRC, valor indicado en el catálogo de Bohman [20]. Después del procedimiento experimental considerando los diferentes niveles y factores, el valor más elevado de dureza promedio es de 60.9 HRC en la probeta 14, con temperatura de cementado de 950 °C durante 8 horas y las temperaturas de temple y revenido son de 770 y 150 °C, respectivamente. Para el cementado a 880 °C por 6 horas, con temperaturas de 800 y 150 °C para el temple y revenido, respectivamente, la dureza promedio más baja es en la probeta 6, un 23.81 % inferior que la dureza más alta. Entonces, con las mediciones experimentales de dureza superficial, se puede afirmar que la variable más influyente para incrementar la dureza superficial es el tiempo de cementado, seguido por la temperatura de cementado.

El tiempo de cementado, que es considerado como la variable de estudio para esta Investigación, tiene una influencia del 19.66 %. De esta información, se puede recalcar

que a medida que se sigue sobrepasando la temperatura de austenización, el carbono penetra más profundamente en el acero. Mientras que, con un mayor tiempo de exposición a una misma temperatura, el carbono empieza a crear una capa superficial que no se adhiere completamente al acero y puede ser removida con facilidad.

RECOMENDACIONES

Se requiere que las probetas tengan una superficie paralela a la base para tomar las mediciones de dureza superficial. Por lo que se debe realizar un refrentado uniforme para obtener el mismo espesor en todo el contorno de la probeta.

Los procedimientos con arranque de viruta, corte y refrentado deben ser realizados utilizando líquido refrigerante como aceite soluble (taladrina), para evitar calentar el material durante estos procedimientos y puedan influir posteriormente en los tratamientos térmicos y mediciones de dureza superficial.

La adherencia, así como el espesor de recubrimiento después de un tratamiento térmico varía entre las probetas, e incluso sobre la superficie de una misma probeta. Por este motivo, se sugiere trazar simétricamente en todas las probetas los puntos para la medición de dureza superficial.

En la realización del temple de las probetas en aceite, es necesario utilizar el equipo de protección adecuado para poder controlar y manipular el movimiento de la bandeja contenedora. De esta manera, se va a lograr un enfriamiento uniforme en todas las probetas evitando que éstas caigan en el depósito de aceite y no tengan el enfriamiento correcto.

Esta investigación propuso como caso de estudio la influencia del tiempo de cementado, sin embargo, se determina que la variable de mayor influencia es la temperatura de cementado. Entonces, para trabajos posteriores, es recomendable analizar a profundidad el diagrama de cambio de fase TTT del acero AISI/SAE 1018 para estudiar las temperaturas críticas y demostrar experimentalmente cuánto se puede incrementar la dureza a medida que se sobrepasa la temperatura de austenización.

BIBLIOGRAFÍA

- [1] E. Pérez, R. Cabrera-Sierra, I. González y F. Ramírez-Vives, «Influence of *Desulfovibrio* sp. biofilm on SAE 1018 carbon steel corrosion in synthetic marine medium,» *Corrosion Science* , vol. 49, pp. 3580-3597, 2007.
- [2] F. Dittrich, J. Kaars, B. Masek, S. Jenicek, M. Wagner y P. Mayr, «HAZ characterization of welded 42SiCr steel treated by quenching and partitioning,» *Journal of Materials Processing Tech.*, vol. 268, pp. 37-46, 2019.
- [3] M. Hasan, A. Hussein, A. Hasan y O. Ali, «Improvement of AISI 1018 Carbon Steel Gr 1018 mechanical properties by liquid carburizing in salt bath,» *Materials Today: Proceedings*, pp. 1-5, 2020.
- [4] R. Elemuren, A. Tamsaki, R. Evitts, N. Oguocha, G. Kennell, R. Gerspacher y A. Odeshi, «Erosion-corrosion of 90° AISI 1018 steel elbows in potash slurry: Effect of particle concentration on surface roughness,» *Wear*, Vols. %1 de %2430-431, pp. 37-49, 2019.
- [5] F. Pacheco, G. Quezada y I. Purizaga, «Efecto del tiempo de carburización y tiempo de carbonitruración sobre la templabilidad, resistencia al desgaste y dureza superficial en el acero AISI 1020,» [En línea]. Available: <http://dspace.unitru.edu.pe/bitstream/handle/UNITRU/12049/PACHECO%20DE%20LA%20CRUZ%2c%20Frank%20Harold%3bQUEZADA%20ROJAS%2c%20Gianfranco%20Joel.pdf?sequence=1&isAllowed=y>. [Último acceso: 09 Junio 2020].
- [6] W. Salazar, B. Pinzón, J. Rojas, J. Cumblera y A. Tejedor, «Estudios de Cementación de aceros con carbones vegetales nacionales,» *Primer Congreso Nacional de Ingeniería, Ciencia y Tecnología*, vol. 1, pp. 1-5, 2005.
- [7] B. Aleman, «Evaluación del proceso de endurecimiento superficial de un acero SAE 1020 mediante carburización sólida y posterior temple y revenido,» [En línea]. Available: <http://repositorio.unsa.edu.pe/bitstream/handle/UNSA/2884/MTalmorb020.pdf?sequence=1&isAllowed=y>. [Último acceso: 19 Junio 2020].

- [8] U. Miranda y C. Laura, «Cementación sólida de un acero de bajo carbono empleando carbón vegetal y conchas marinas como activador ecológico,» [En línea]. Available: <http://repositorio.unsa.edu.pe/bitstream/handle/UNSA/1912/MTmiquug.pdf?sequence=1&isAllowed=y>. [Último acceso: 09 Junio 2020].
- [9] J. Piñeiros, W. Porras y C. Bohorquez, «Análisis de la influencia de la cementación en el tratamiento térmico de temple desde temperaturas intercríticas y revenido acero AISI / SAE 8620,» [En línea]. Available: <http://repository.udistrital.edu.co/bitstream/11349/4788/1/Pi%c3%blerosTorresJainerSantiago.pdf>. [Último acceso: 11 Junio 2020].
- [10] C. Muñoz, J. Cuellar, C. López y C. Bohorquez, «Influencia del tratamiento térmico de temple a temperaturas intercríticas en las propiedades mecánicas del acero AISI / SAE 1018,» [En línea]. Available: <https://repository.unilibre.edu.co/bitstream/handle/10901/7820/LopezRobayoCarlosAlberto2014.pdf?sequence=1&isAllowed=y>. [Último acceso: 11 Junio 2020].
- [11] S. Kalpakjian y S. Schmid, Manufactura, Ingeniería y Tecnología, Naucalpan de Juárez: Pearson Educación, 2002.
- [12] J. Domínguez y J. Ferrer, Metales y aleaciones: Mecanizado básico, Madrid: Editex, 2017.
- [13] R. Mott, Diseño de elementos de máquinas, Naucalpan: Pearson, 2006.
- [14] J. Strike, De la construcción a los proyectos: Influencia de las nuevas técnicas de diseño arquitectónico, Barcelona: Reverté, S.A., 2004.
- [15] B. Jiménez, Soldadura MAG de chapas de acero al carbono FMEC0210, Antequera: IC, 2017.
- [16] M. Groover, Fundamentos de Manufactura Moderna - Materiales, procesos y sistemas, Naucalpan: Pearson Pretice Hall, 1997.
- [17] R. Budynas y K. Nisbett, Diseño en Ingeniería Mecánica de Shigley, México, D.F.: McGraw-Hill Interamericana, 2008.
- [18] W. Smith y J. Hashemi, Fundamentos de la Ciencias e Ingeniería de Materiales, México D.F.: Mc-Graw Hill Companies, Inc., 2006.

- [19] «DIPAC Productos de Acero,» [En línea]. Available: <http://www.dipacmanta.com/aisi-1018-transmision>. [Último acceso: 25 Marzo 2020].
- [20] Ivan Bohman C.A., «Acero de bajo contenido de carbono- AISI 1018,» [En línea]. Available: <https://www.ivanbohman.com.ec/wp-content/uploads/2018/10/Catalogo-general-IBCA-2018-.pdf>. [Último acceso: 25 Marzo 2020].
- [21] QUARK, «Acero 1018 y el 1020 y sus características,» [En línea]. Available: <https://corpmetales.com/acero-1018-1020-caracteristicas/>. [Último acceso: 25 Marzo 2020].
- [22] Böhler, «Transmisión AISI 1018,» [En línea]. Available: <https://www.bohlerperu.com/app/uploads/sites/138/2019/09/TRANSMISION.pdf>. [Último acceso: 25 Junio 2020].
- [23] MOTORGIGA, «Endurecimiento superficial,» [En línea]. Available: <https://diccionario.motorgiga.com/diccionario/endurecimiento-superficial-definicion-significado/gmx-niv15-con194004.htm>. [Último acceso: 26 Marzo 2020].
- [24] S. E. Certainty, «ENSAYO DE DUREZA ROCKWELL,» [En línea]. Available: <https://www.struers.com/es-ES/Knowledge/Hardness-testing/Rockwell#>. [Último acceso: 26 Marzo 2020].
- [25] P. Molera Solá, Tratamiento térmico de los metales, Barcelona : MARCOMBO, 1991.
- [26] W. Callister, Ciencia e Ingeniería de los Materiales, Barcelona: Reverté, S.A..
- [27] J. Garavito, «Escuela Colombiana de Ingeniería,» [En línea]. Available: https://www.escuelaing.edu.co/uploads/laboratorios/1537_tratamientostermicosr2.pdf. [Último acceso: 26 Marzo 2020].
- [28] UPV, «Tratamiento térmico de los aceros,» [En línea]. Available: https://www.upv.es/materiales/Fcm/Fcm06/fcm6_2.html. [Último acceso: 26 Marzo 2020].
- [29] N. Salán Ballesteros, Tecnología de proceso y transformación de materiales, Barcelona: UPC, 2005.

- [30] P. Galabru, Obras de fábrica y metálicas, Barcelona: Reverté, S.A., 2004.
- [31] C. A. Fortuna, «Acero grado maquinaria AISI 1018,» [En línea]. Available: http://www.acerosfortuna.com.mx/hojas_tecnicas/aceros_al_carbono/1018.pdf . [Último acceso: 26 Marzo 2020].
- [32] Universidad Tecnológica Nacional, «Metalografía y Tratamientos térmicos,» [En línea]. Available: [https://www.frro.utn.edu.ar/repositorio/catedras/mecanica/5_anio/metalografia/12._Cementacion_\(a\)_v2.pdf](https://www.frro.utn.edu.ar/repositorio/catedras/mecanica/5_anio/metalografia/12._Cementacion_(a)_v2.pdf). [Último acceso: 25 Marzo 2020].
- [33] E. Degarmo, J. Black y R. Kohser, Materiales y Procesos de Fabricación, Barcelona: Reverté, S.A., 2002.
- [34] S. Barroso, J. Gil y A. Camacho , Introducción al conocimiento de los materiales y sus aplicaciones, Madrid: Uned, 2010.
- [35] C. Torres, M. Ojeda y H. Viteri, «Tratamientos térmicos, pruebas mecánicas y metalográficas de los aceros utilizados en el campo automotor a nivel nacional,» [En línea]. Available: <http://dspace.uazuay.edu.ec/bitstream/datos/6294/1/08084.pdf>. [Último acceso: 29 Junio 2020].
- [36] ASTM International, «ASTM E18 - 19. Standard Test Methods for Rockwell Hardness of Metallic Materials,» [En línea]. Available: <https://www.astm.org/Standards/E18.htm>. [Último acceso: 24 Febrero 2020].
- [37] A. Jayaraman, J. Earthman y T. Wood, «Corrosion inhibition by aerobic biofilms on SAE 1018 steel,» *Appl Microbiol Biotechnol* , vol. 47, pp. 62-68, 1997.
- [38] ASTM International, «ASTM E407 Nital,» [En línea]. Available: [https://www.smslabs.com/content/Etchants/Nital%20\(ASTM-74\).pdf](https://www.smslabs.com/content/Etchants/Nital%20(ASTM-74).pdf). [Último acceso: 11 Julio 2020].
- [39] Micros Austria, «Material Science Analysis Microscopes - MCXI700,» [En línea]. Available: http://www.xlab.ro/data_files/product_documents/190/microscop_20mcxi700_20gold.pdf. [Último acceso: 13 Julio 2020].

- [40] Oxford Instruments, «Foundry-Master Xpert,» [En línea]. Available: <https://pdf.directindustry.com/pdf/oxford-instruments-x-ray-technology/foundry-master-xpert-brochure/124037-500457.html#search-en-xpert>. [Último acceso: 13 Julio 2020].
- [41] Calright Instruments, «Phase II 900- 365 Digital Rockwell Hardness Tester,» [En línea]. Available: <https://calright.com/wp-content/uploads/2018/03/3030.pdf>. [Último acceso: 24 Febrero 2020].
- [42] Nabertherm, «Tecnología para Procesos Térmicos,» [En línea]. Available: https://www.nabertherm.com/produkte/thermprozessstechnik/thermalprocesstechnology2_spanish.pdf. [Último acceso: 24 Febrero 2020].
- [43] BonGROUP, «Aceites de temple DURIXOL de alto rendimiento con un efecto de enfriamiento muy rápido,» [En línea]. Available: <https://www.bongroup.de/produkte/abschreckoele/>. [Último acceso: 15 Julio 2020].
- [44] J. Kennedy y A. Neville, Estadística para ciencias e ingeniería, México, D.F.: Harla, 1982.
- [45] Grupo Stayer, «Sierra de cinta SN1470,» [En línea]. Available: <https://www.stayer.es/linea-pro/maquinas-de-metal/sierras-de-cinta/sn1470/>. [Último acceso: 08 Julio 2020].

ANEXOS

Anexo 1. Acero SAE 1018 de Bohman [20].

ACEROS

Eje de transmisión

► Cód. IBCA: SAE 1018 - Tolerancias h10 - h11



Información general

Acero de bajo contenido de carbono.

Análisis típico %	C	Mn	P	S
SAE 1018	0.15 - 0.20	0.60	0.040	0.050
Código de color	Azul			

Aplicaciones

Donde se requiera aplicaciones con cargas mecánicas no muy severas, pero con ciertos grados de tenacidad importantes, como por ejemplo: pernos y tuercas, piezas de máquinas pequeñas, ejes, bujes, pasadores, grapas, etc.

Factible de cementación con buena profundidad de penetración debido a su alto contenido de manganeso.

Excelente soldabilidad.

Propiedades mecánicas

Suministrado laminado en frío (medidas pequeñas 2 1/2" o torneado (medidas hasta 6"). Las medidas 7", 8" y 10" son suministradas laminadas en caliente o torneado de desbaste.

Diámetro, mm	
Esfuerzo de cedencia (kg/mm ²)	min 31
Resistencia a la tracción (kg/mm ²)	51 - 71
Elongación, A5	20 %
Reducción de área, Z	57 %
Dureza (HB)	163

Medidas en stock

Diámetro (mm)	Peso (kg/m)	Diámetro (mm)	Peso (kg/m)	Diámetro (mm)	Peso (kg/m)
1/4	0.2	1.3/8	7.5	4	63.6
5/16	0.4	1.1/2	8.9	4.1/2	80.5
3/8	0.6	1.3/4	12.2	5	99.4
1/2	1.0	2	15.9	5.1/2	120.3
5/8	1.6	2.1/4	20.1	6	143.2
3/4	2.2	2.1/2	24.9	7	194.9
7/8	3.0	2.3/4	30.1	8	254.6
1	4.0	3	35.8	9	322.2
1.1/8	5.0	3.1/4	42.0	10	397.8
1.1/4	6.2	3.1/2	48.7		

TRANSMISIÓN



AISI : ~ 1018
DIN : CK-15
W N°: 1.1141

Tipo de aleación promedio : C 0,17 Si 0,25 Mn 0,70 %
Color de identificación : Blanco
Estado de suministro : Trefilado h11
Largo estándar : Entre 5.8 y 6.10 metros

Acero de cementación no aleado para piezas pequeñas, exigidas principalmente al desgaste y donde la dureza del núcleo no sea importante. Buena soldabilidad.

APLICACIONES: Levas, uniones, bujes, pines, pivotes, partes prensadas o troqueladas, pernos grado 1, ejes de transmisión con baja exigencia al torque.

INDICACIONES PARA EL TRATAMIENTO TÉRMICO

Forjar: 1150 - 850 °C
Normalizar: 890 - 920 °C
Recocer: 650 - 700 °C
Enfriamiento lento en el horno
Cementar: 880 - 950 °C
Templar después de cementar; al agua(*): 770 - 800 °C
Dureza obtenible en la capa cementada(*): 58 - 60 HRC
Revenir: 150 - 200 °C
Soldadura: Precalentamiento entre 120-180°C

Acero fácilmente soldable con electrodos

BÖHLER UTP 6020, BÖHLER UTP 76, BÖHLER E 7018

25

CARACTERÍSTICAS MECÁNICAS EN ESTADO RECOCIDO				
DUREZA BRINELL HB	LÍMITE DE FLUENCIA N/mm ²	RESISTENCIA A LA TRACCIÓN N/mm ²	ELONGACIÓN L = 5d % LONG. TRANSV.	RESIST. AL IMPACTO DVM JOULE LONG. TANG. TRANSV.
143 máx.	235	410 - 520	20 - 19	48 - 31 - 24

(*) Soldadura y Tratamiento Térmico: Consultar con Departamento Técnico.

8

Anexo 3. Norma ASTM E18 – 15 [36].



Designation: E18 – 15

An American National Standard

Standard Test Methods for Rockwell Hardness of Metallic Materials^{1,2}

This standard is issued under the fixed designation E18; the number immediately following the designation indicates the year of original adoption or, in the case of revision, the year of last revision. A number in parentheses indicates the year of last reapproval. A superscript epsilon (ϵ) indicates an editorial change since the last revision or reapproval.

This standard has been approved for use by agencies of the U.S. Department of Defense.

1. Scope*

1.1 These test methods cover the determination of the Rockwell hardness and the Rockwell superficial hardness of metallic materials by the Rockwell indentation hardness principle. This standard provides the requirements for Rockwell hardness machines and the procedures for performing Rockwell hardness tests.

1.2 This standard includes additional requirements in annexes:

Verification of Rockwell Hardness Testing Machines	Annex A1
Rockwell Hardness Standardizing Machines	Annex A2
Standardization of Rockwell Indenters	Annex A3
Standardization of Rockwell Hardness Test Blocks	Annex A4
Guidelines for Determining the Minimum Thickness of a Test Piece	Annex A5
Hardness Value Corrections When Testing on Convex Cylindrical Surfaces	Annex A6

1.3 This standard includes nonmandatory information in appendixes which relates to the Rockwell hardness test.

List of ASTM Standards Giving Hardness Values Corresponding to Tensile Strength	Appendix X1
Examples of Procedures for Determining Rockwell Hardness Uncertainty	Appendix X2

1.4 *Units*—At the time the Rockwell hardness test was developed, the force levels were specified in units of kilograms-force (kgf) and the indenter ball diameters were specified in units of inches (in.). This standard specifies the units of force and length in the International System of Units (SI); that is, force in Newtons (N) and length in millimeters (mm). However, because of the historical precedent and continued common usage, force values in kgf units and ball diameters in inch units are provided for information and much of the discussion in this standard refers to these units.

1.5 The test principles, testing procedures, and verification procedures are essentially identical for both the Rockwell and

Rockwell superficial hardness tests. The significant differences between the two tests are that the test forces are smaller for the Rockwell superficial test than for the Rockwell test. The same type and size indenters may be used for either test, depending on the scale being employed. Accordingly, throughout this standard, the term Rockwell will imply both Rockwell and Rockwell superficial unless stated otherwise.

1.6 *This standard does not purport to address all of the safety concerns, if any, associated with its use. It is the responsibility of the user of this standard to establish appropriate safety and health practices and determine the applicability of regulatory limitations prior to use.*

2. Referenced Documents

2.1 ASTM Standards:³

- A370 Test Methods and Definitions for Mechanical Testing of Steel Products
- A623 Specification for Tin Mill Products, General Requirements
- A623M Specification for Tin Mill Products, General Requirements [Metric]
- B19 Specification for Cartridge Brass Sheet, Strip, Plate, Bar, and Disks
- B36/B36M Specification for Brass Plate, Sheet, Strip, and Rolled Bar
- B96/B96M Specification for Copper-Silicon Alloy Plate, Sheet, Strip, and Rolled Bar for General Purposes and Pressure Vessels
- B103/B103M Specification for Phosphor Bronze Plate, Sheet, Strip, and Rolled Bar
- B121/B121M Specification for Leaded Brass Plate, Sheet, Strip, and Rolled Bar
- B122/B122M Specification for Copper-Nickel-Tin Alloy, Copper-Nickel-Zinc Alloy (Nickel Silver), and Copper-Nickel Alloy Plate, Sheet, Strip, and Rolled Bar
- B130 Specification for Commercial Bronze Strip for Bullet Jackets
- B134/B134M Specification for Brass Wire

¹ These test methods are under the jurisdiction of ASTM Committee E28 on Mechanical Testing and are the direct responsibility of Subcommittee E28.06 on Indentation Hardness Testing.

Current edition approved Feb. 1, 2015. Published March 2015. Originally approved in 1932. Last previous edition approved in 2014 as E18 – 14a. DOI: 10.1520/E0018-15.

² In this test method, the term Rockwell refers to an internationally recognized type of indentation hardness test as defined in Section 3, and not to the hardness testing equipment of a particular manufacturer.

³ For referenced ASTM standards, visit the ASTM website, www.astm.org, or contact ASTM Customer Service at service@astm.org. For *Annual Book of ASTM Standards* volume information, refer to the standard's Document Summary page on the ASTM website.

*A Summary of Changes section appears at the end of this standard

Anexo 3. Norma ASTM E18 – 15 [36]. (Continuación).



E18 – 15

stating the Rockwell hardness scales that are covered by the accreditation, and the standards to which the test block standardizations are traceable.

NOTE A4.1—Accreditation is a new requirement starting with this edition of the standard.

A4.3 Manufacture

A4.3.1 The attention of the manufacturer of test blocks is drawn to the need to use material and a manufacturing process which will give the necessary homogeneity, stability of structure, and uniformity of surface hardness. For quality control purposes, test blocks should be examined for homogeneity and uniformity of surface hardness in accordance with a statistically acceptable sampling procedure.

A4.3.2 The test blocks, if of steel, shall be demagnetized at the end of the manufacturing process.

A4.3.3 To assure that material is not removed from the test surface after standardization, an identifying mark shall be made on the test surface. The mark shall be such that it can not be removed by any method other than removal of test block material.

A4.3.4 The standardized test block shall meet the physical requirements of Table A4.1.

A4.4 General Requirements

A4.4.1 The standardizing laboratory environment, the standardizing machine, and the standardizing test cycle shall satisfy the requirements of Annex A2.

A4.4.2 All instruments used to make measurements required by this Annex shall have been calibrated traceable to national standards where a system of traceability exists, except as noted otherwise.

A4.5 Standardization Procedure

A4.5.1 A test block is standardized by calibrating the average hardness of the test surface to a specific Rockwell hardness standard. Only one surface of the test block shall be calibrated. When possible, the test blocks should be calibrated traceable to national Rockwell standards (see Note A4.2). The Rockwell standard to which the test blocks are traceable shall be stated in the certification.

NOTE A4.2—In the United States, the national Rockwell hardness standardizing laboratory is the National Institute of Standards and Technology (NIST), Gaithersburg, MD 20899.

NOTE A4.3—Primary standardized test blocks are available as Standard Reference Material from NIST, Gaithersburg, MD 20899.

TABLE A4.1 Physical Requirements of Standardized Test Blocks

Test Block Parameter	Tolerance
Thickness	≥ 6.0 mm (0.236 in.) ≤ 16.0 mm (0.630 in.)
Test surface area	≤ 2600 mm ² (4 in. ²)
Deviation from surface flatness (test & bottom)	≤ 0.005 mm (0.0002 in.)
Deviation from surface parallelism (test & bottom)	≤ 0.0002 mm per mm (0.0002 in. per in.)
Mean surface roughness (test & bottom)	$R_a \leq 0.003$ mm (12 μ in.) center line average

A4.5.2 Class A ball indenters and Class A or Reference diamond indenters as described in Annex A3 (see Note 3) shall be used for the standardization of test blocks.

A4.5.3 The standardization procedure involves making hardness measurements on the test block surface using the forces and type of indenter that are appropriate for the hardness scale.

A4.5.3.1 Make at least five measurements distributed uniformly over the test surface.

A4.5.4 Determine the nonuniformity range H_R of the measurements as:

$$H_R = H_{max} - H_{min} \quad (A4.1)$$

where:

H_{max} = highest hardness value, and

H_{min} = lowest hardness value.

A4.5.4.1 The nonuniformity range H_R of the standardizing measurements provides an indication of the non-uniformity of the test block hardness. For acceptability, the nonuniformity range H_R shall be within the tolerances of Table A4.2.

A4.5.5 The standardized value of the test block is defined as the average of the standardization measurements \bar{H} .

A4.5.6 In some cases, a more accurate standardized value for the test block may be obtained by correcting the measured average hardness value by a performance offset value for the standardizing machine. The offset value may be based on the error E values measured during the last indirect verification of the standardizing machine. For example, an appropriate offset correction curve for each standardizing machine may be calculated for a specific Rockwell scale by fitting a linear line to the error values measured during the indirect verification.

TABLE A4.2 Maximum Nonuniformity for Standardized Test Blocks

Nominal Hardness of Standardized Test Block	Max. Nonuniformity Range, H_R (HR units)
HRA	≥ 20 and < 80 1.0 ≥ 80 and < 92 0.5
HRBW	≥ 0 and < 45 1.5 ≥ 45 and < 100 1.0
HRC	≥ 20 and < 60 1.0 ≥ 60 and < 70 0.5
HRD	≥ 40 and < 60 1.0 ≥ 60 and < 87 0.5
HREW, HRFW, HRGW, HRHW, HRKW, HRLW, HRMW, HRPW, HRRW, HRSW, HRVW	1.0
HR15N	≥ 69 and < 90 1.0 ≥ 90 and < 97 0.7
HR30N	≥ 41 and < 77 1.0 ≥ 77 and < 92 0.7
HR45N	≥ 19 and < 66 1.0 ≥ 66 and < 87 0.7
HR15TW, HR30TW, HR45TW, HR15WW, HR30WW, HR45WW, HR15XW, HR30XW, HR45XW, HR15YW, HR30YW, HR45YW	1.0

Anexo 4. Sierra de cinta SN1470 [45].

DATOS TÉCNICOS

Motor	Monofásico Kw
Potencia absorbida en carga	1/2 W
Giros en vacío	45 rpm
Dimensión hoja	1470 x 13 x 0.65 mm
Peso	22 Kg
Capacidad de corte a 90° perfil y macizo	Ø100 mm
-rectangular	100 x 150 mm
-cuadrado	100 x 100 mm
Capacidad de corte a 45° perfil y macizo	Ø75 mm
-cuadrado	63 x 63 mm
-rectangular	63 x 100 mm

VENTAJAS

- **Ángulo de Corte de 0° a 45°.**
- Guía ajustable de corte
- Dispositivo de bloqueo para un fácil transporte
- Práctico dispositivo de tensión de la cinta
- **Mordaza en fundición con bloqueo rápido.**
- **Corte seco.**

DOTACIÓN ESTÁNDAR

- Hoja para hierro
- Llave de servicio



SIERRA DE CINTA **SN1470**

EMCOMAT 17D y 20D

[Manejo de palanca única]

- Operación con palanca única para avance longitudinal y transversal

[Protección del plato]

- Con interruptor final
- Husillo principal con diámetro de husillo de 50 mm

[Visualización digital]

- Visualización digital de 3 ejes con pantalla a color

[Motor]

- Potente motor con control de velocidad infinitamente variable

[Cubierta]

- Husillo de cilindrar y roscar con protección

[Banco de máquina]

- Diagonalmente nervado
- Templado por inducción y rectificado
- Soporte de 3 puntos

[Base de máquina]

- Hecha en chapa de acero soldada
- Fácil de transportar
- Bandeja de virutas integrada
- El soporte de 3 puntos para eliminar las vibraciones

Máquina con equipo opcional

Los tornos EMCOMAT 17D/20D se destacan por su óptimo manejo y su excelente ergonomía. Además, están dotados con una indicación digital de 3 ejes con 999 puestos de herramientas, 999 puntos de contorno, una velocidad de corte constante y una regulación de velocidades sin escalones.

Anexo 5. Torno EMCOMAT 17D [46]. (Continuación).

[Datos técnicos]



	EMCOMAT 14D	EMCOMAT 17D	EMCOMAT 20D
Área de trabajo			
Distancia entre centros	650 mm	700 mm	1000 mm
Altura de centros	140 mm	170 mm	200 mm
Volteo sobre bancada	280 mm	340 mm	400 mm
Volteo sobre carro transversal	170 mm	190 mm	250 mm
Carro longitudinal	590 mm	600 mm	900 mm
Carro longitudinal sobre carro transversal	135 mm	220 mm	220 mm
Carro longitudinal de carro superior	100 mm	110 mm	110 mm
Sección de herramienta de corte	12 x 12 mm	20 x 20 mm	20 x 20 mm
Husillo principal			
Nariz de husillo	CAMLOCK DIN 55029 S4	CAMLOCK DIN 55029 S5	CAMLOCK DIN 55029 S5
Diám. interior de husillo	Ø 40 mm	Ø 50 mm	Ø 50 mm
Diámetro máx. de plato liso	152 mm	200 mm	260 mm
Diámetro máx. de plato	140 mm	200 mm	200 mm
Velocidad de husillo	60–4000 rpm	40–3000 rpm	40–3000 rpm
Velocidades rotativas	continua	mecánica	continua
Gamas de velocidad	2	4	4
Gamas de velocidad	60–2000 2000–4000 rpm	40–130, 110–360 310–1070, 870–3000 rpm	40–130, 110–360 310–1070, 870–3000 rpm
Motor de accionamiento			
Potencia	7,5 kW	5,3 kW	5,3 kW
Gama de avances			
Avances longitudinales*	0,03–0,3 mm/r	0,045–0,787 mm/r	0,045–0,787 mm/r
Avances transversales*	0,015–0,15 mm/r	0,023–0,406 mm/r	0,023–0,406 mm/r
Velocidades de corte			
Roscas métricas (básicas)	15 (0,25–2,5 mm)	20 (0,4–7,0 mm)	20 (0,4–7,0 mm)
Roscas métricas*	13 (0,125–5 mm)	28 (0,4–7 mm)	28 (0,4–7 mm)
Roscas en pulgadas*	29 (96–4 calibre/pulg.)	32 (4–56 calibre/pulg.)	32 (4–56 calibre/pulg.)
Roscas modulares*	12 (0,25–2,5)	28 (0,2–3,5)	28 (0,2–3,5)
Roscas diametrales**	25 (96–11)	32 (8–112)	32 (8–112)
Contrapunto			
Diámetro de la caña	30 mm	50 mm	50 mm
Cono morse	MK 2	MK 3	MK 3
Carrera de la caña	80 mm	120 mm	120 mm
Desplazamiento lateral	+10/–8 mm	+/-13 mm	+/-13 mm
Niveles de ruido			
Máx. nivel de ruido DIN 45635	77 dB(A)	79 dB(A)	79 dB(A)
Peso de herramienta permitido			
Al aire	45 kg	50 kg	50 kg
Con contrapunto	80 kg	150 kg	150 kg
Conexión eléctrica			
Alimentación	400 V/3 PE/50(60) Hz	400–440 V/3 PE/50(60) Hz	400–440 V/3 PE/50(60) Hz
Datos generales			
L x A x An de la máquina	1330 x 835 x 1570 mm	1650 x 1060 x 1635 mm	1950 x 1060 x 1635 mm
Al tura del husillo sobre el suelo	1100 mm	1103 mm	1103 mm
Peso total	420 kg	755 kg	865 kg

*La gama de avances y el número de pasos de rosca pueden ampliarse usando engranajes adicionales (opcional).



SP3381 - 02/14 - Sujeto a cambios debido a avances técnicos. Excepción errores u omisiones.

EMCO MAIER Ges.m.b.H.
Salzburger Str. 80 · 5400 Hallein-Taxach · Austria
Teléfono +43 6245 891-0 · Fax +43 6245 869 65 · info@emco.at

www.emco-world.com

Anexo 5. Torno EMCOMAT 17D [46]. (Continuación).

SAFETY DATA SHEET Sturbridge Metallurgical

ASTM E407-74 Nital Etchant
Rev Date: JAN 2016

Section 1: CHEMICAL PRODUCT AND COMPANY IDENTIFICATION

Product Name: ASTM E407-74 2-5% Nital Etchant
Part Number: ASTM74-(all sizes)
Manufacturer: Sturbridge Metallurgical Services Inc.
City, State, Zip: Sturbridge MA 01566
Phone Number: 508-347-5288
Emergency Phone: CHEMTREC 1-800-424-9300

Section 2: Hazard(s) Identification

Hazardous classification of the substance or mixture:

Hazard Class	Category code
Flammable liquid:	2
Skin Corrosion	1A
Serious Eye Damage	1
Acute toxicity (oral):	3
Acute toxicity (inhalation):	3
Specific Target Organ Toxicity – Single Exposure:	1

Signal word: Danger

Pictogram:



Hazard statement(s):

H225 Highly flammable liquid and vapor.
H314 Cause severe skin burn and eye damage.
H301+H331 Toxic if swallowed or inhaled.
H370 Cause damage to organs.

Precautionary statement(s):

P210 Keep away from heat/sparks/open flames/hot surfaces – No smoking.
P260 Do not breathe dust/fume/gas/mist/vapors/spray.
P280 Wear protective gloves/protective clothing/eye protection/face protection.

Response statement(s):

P303+P361+P353 IF ON SKIN (or hair): remove/take off immediately all contaminated clothing. Rinses skin with water/shower.
P305+P351+P338 IF IN EYES: Rinse cautiously with water for several minutes. Remove contact lenses, if present and easy to do. Continue rinsing.

P301+P330+P331+P310 IF SWALLOWED: rinse mouth. DO NOT induce vomiting. Immediately call a POISON CENTER or Doctor/physician.

Storage statement(s):

P403+P233+P235 Store in a well-ventilated place. Keep container tightly closed. Keep cool.
P405 Store locked up.

Disposal statement(s):

P501 Dispose of contents/container in accordance with local/regional/national/international regulations.

Hazard(s) not otherwise classified: No information.

Label elements: See tables above

HMIS Ratings:

NFPA Ratings:

WWW.SMSLABS.COM SDS-ASTM E407-74 2-5% Nital Etchant

Anexo 5. Torno EMCOMAT 17D [46]. (Continuación).

SAFETY DATA SHEET Sturbridge Metallurgical	ASTM E407-74 Nital Etchant Rev Date: JAN 2016
------------------------------------------------------	---------------------------------------------------------

Health: 3 Flammability: 3 Reactivity: 1	Health: 3 Flammability: 3 Reactivity: 1 Special hazard: None
-----------------------------------------------	-----------------------------------------------------------------------

Section 3: Composition/Information on Ingredients

Component	CAS No.	Concentration
Methanol (methyl alcohol)	67-56-1	Balance
Nitric Acid	7697-37-2	2-5%

METAL	USE	Etch Procedure
Pure Iron	Grain Boundaries	a) Immerse few seconds to a minute
Fe + C and	General Structure	a) Immerse few seconds to a minute
Fe + <1 C + <4 % additions	Ferrite grain boundaries	
Tool Steels	General Structure	a) Immerse few seconds to a minute
		b) Immerse 5–40 s in 5 % HNO ₃ solution. To remove stain, immerse 25s in 10% Hclmethanol solution
Pb + <2 Sb, Pb + >2 Sb	General Structure	b) Immerse 5–40 s in 5 % HNO ₃ solution. To remove stain, immerse 25s in 10% Hclmethanol solution
Babbitt	General Structure	a) Immerse few seconds to a minute
Pure Magnesium	General Structure	a) Immerse few seconds to a minute
Mg-Mn	General Structure	a) Immerse few seconds to a minute
Mg-Al, Mg-Al-Zn (Al + Zn >5 %)	General Structure	a) Immerse few seconds to a minute
Mg-Zn-Zr	General Structure	a) Immerse few seconds to a minute
Mg-Th-Zr & Mg-Rare Earth-Zr	General Structure	a) Immerse few seconds to a minute
		(e) Swab 5–60 s. HNO ₃ may be increased to 30 mL in methanol only depending on alloy. (Ethanol is unstable with over 5 % HNO ₃ .) Do not store.
Ni-Fe	Orientation Pitting	
		(e) Swab 5–60 s. HNO ₃ may be increased to 30 mL in methanol only depending on alloy. (Ethanol is unstable with over 5 % HNO ₃ .) Do not store.
Ni-Mn	General Structure	
Pure Tin, Sn-Cd, Sn-Fe	General Structure	(d) Swab or immerse several minutes
		b) Immerse 5–40 s in 5 % HNO ₃ solution. To remove stain, immerse 25s in 10% Hclmethanol solution
Sn-Pb	General Structure	b) Immerse 5–40 s in 5 % HNO ₃ solution. To remove stain, immerse 25s in 10% Hclmethanol solution
Sn-Sb-Cu	General Structure	
Zn-Fe	Structure of galvanized sheet	a) Immerse few seconds to a minute
Composition		
1–5 mL HNO ₃		
100 mL ethanol (95 %) or methanol (95 %)		

COPPER MCXM800

Metallurgical microscope

OPTICS
Objectives: MET ICO PLAN 5x/0.12, 10x/0.25, 20x/0.40, 50x/0.75. Eyepieces: EW 10x/20 widefield with diopeter adjustment and eyeshields.

MECHANICS
Body: Sturdy, high-tech aluminium casting. 300 x 295 mm basic. **Head:** Binocular or trinocular head. 30° inclined, 360° rotatable. Interpupillary distance 55-75 mm. **Noisepiece:** Quintuple reverse-angle ball-bearing noise-piece. **Stage:** Double layer specimen stage (160 x 140 mm) with stage clips, moving range 72 x 50 mm. **Illumination:** 6V30W halogen for 100 - 240 V / 50 - 60Hz.

Polarization filter set and colour filters included as standard

OPTIONS
ERGO head with variable inclination from 5° to 35°, various eyepieces, objective MET ICO PLAN 100x/0.75, WD 0.7 mm, photo/video adapters, digital camera, aluminium carrying case.

GOLD MCXI700

Inverted Metallurgical Microscope

Inverted microscopes are used for inspection, analysis and testing of microstructures of materials. The special design is necessary for observing large and heavy parts, e.g. metallurgical or electronic parts which are integrated in a compact body without special and expensive sample preparation.

OPTICS
Objectives: MET ICO PLAN 5x/0.12, 10x/0.25, 20x/0.40, 50x/0.75. Eyepieces: EMF 10x/22 high eyepoint

MECHANICS
Body: Sturdy base. 360 x 280 mm. **Head:** ERGO head with variable inclination from 5° to 35°. **Noisepiece:** Quintuple ball-bearing noise-piece. **Stage:** Plain stage with glass insert plate. **Illumination:** 6V30W halogen for 100 - 240 V / 50 - 60 Hz.

OPTIONS
Photo/video port for ERGO head, binocular or trinocular head, objective MET ICO PLAN 100x/0.75, WD 0.7 mm, various eyepieces, detachable mechanical stage, auxiliary stages, photo/video adapters, digital camera, aluminium carrying case.

Polarization filter set and colour filters included as standard




Typically used for opaque samples, these industrial microscopes utilize through lens illumination, therefore these highly corrected objectives play a decisive role in achieving the best image quality.

The new ICO PLAN infinite objectives provide a clear image for all magnifications. The chromatic aberrations and curvature of field are corrected over the complete field of view.

FOUNDRY-MASTER Xpert

The benchmark for benchtop OES instruments

With the experience of experts the FOUNDRY-MASTER Xpert has been engineered to set the benchmark for benchtop OES metal analysers.

It delivers high accuracy in analytical results, assures precise identification of materials and covers even critical elements like Pb, Se and La with low detection limits. There is no need to make any compromises between element selection and wavelength range.

The FOUNDRY-MASTER Xpert is the ideal cost-effective solution for all metal processing industries. There is virtually no restriction on the element selection. The highest levels of accuracy and precision of the analytical results and a powerful yet easy-to-use software package mean that almost every application is covered. As a result, the cost of ownership is the lowest available on the market.



Product highlights

Highest analytical performance using robust yet reliable technology

- New CCD readout design allows the use of OI's Dynamic Integration Algorithm (DIA), providing superior precision of the results
- High-resolution Multi-CCD optics for best spectral line separation
- Widest spectral range from 130 to 750 nm, covering nearly all interesting elements for any metal material including Nitrogen in steel
- Digital spark generator with optimised discharge parameters for atomic lines, lowering detection limits of a wide range of elements
- Excellent long-term stability, ensured by peak position alignment (PPA)
- Vacuum optical system for best low wavelength transparency
- Contamination free due to oil trap and oil mist filter
- External PC workstation incorporating the latest technology



Solid, robust technology and compact design allow continuous use in any location, in the lab or on-site, even in rugged conditions.



FOUNDRY-MASTER Xpert

COES

Based on the latest CCD technologies the FOUNDRY-MASTER Xpert performs at the highest level with an unbeatable and outstanding price-performance ratio

Ease-of-use and simplicity

The intuitive user interface and numerous customer-driven features make analysis work easy and simple. Just place the sample on the sample stand, start the measurement and read the results.

- Daily routine functions easily performed and monitored
- Special protected user levels for untrained personnel ensure necessary integrity of data and results
- Windows®-based user interface is familiar and intuitive yet flexible
- System's self-diagnostics is fully integrated

Thanks to our unique Jet-Stream technology, the argon consumption is remarkably lower compared to gas purged optical systems. Optimised gas flow ensures minimum argon consumption and less deposits, which means:

- Lowest cost of ownership in its class
- Easy cleaning of the work surface



Different sample adaptors available

Unique sample stand

Equipped with an open spark stand and our unique proven Jet-Stream-Technology, the FOUNDRY-MASTER Xpert ensures the straightforward and precise measurement of samples even with complex and irregular shapes and sizes. The stand is easily accessible from three sides, no need to speculate about sample dimensions.



Results, reports and result processing options at your fingertips

- A wide variety of result forms from concentrations and grade ID's to intensity data and SD's
- Automatic storage and printout of results and transmission to remote devices
- Direct output of results to productivity tools such as word processors and spreadsheets
- Flagging of results beyond calibration range or out of material specs



Advanced FOUNDRY-MASTER Xpert software

Thanks to a unique WASLab and familiar Windows®-based software, any operator can routinely produce stable, reliable measurement results with the FOUNDRY-MASTER Xpert. The software is specifically designed to run on CCD spectrometers and provides all of the functions required for calibration, recalibration, analysis and reporting.

FOUNDRY-MASTER Xpert

OXFORD

FOUNDRY-MASTER Xline

Metal analysis – fast, easy and precise

- Analysis of all ferrous metals and alloys (Al, Ni, Cu material on request)
- Jet-Stream technology
- Low argon consumption
- Precise analysis including material identification
- Spark stand easily accessible

Top performance spectrometer at outstanding value

The **FOUNDRY-MASTER Xline** is a reliable entry level laboratory spectrometer for the qualitative and quantitative element analysis of metal samples. The instrument is designed for laboratory use as a benchtop unit. The reasonably priced unit offers outstanding performance and practical features usually only found with premium class instruments.

Low operating costs and easy maintenance

The instrument is based on optical emission spectroscopy (OES), the analysing method favoured by most foundries. The fully digital source (spark generator) is controlled via the external Windows® PC and offers ideal excitation parameters.

The high-resolution Multi-CCD optics, utilises a vacuum technology chamber in order to cover the complete wavelength range from 165 to 750 nm, offering accurate detection of all relevant elements in the Technet.



The rugged and approved vacuum technology is essentially maintenance-free and has significantly lower operating costs than alternative inert gas purged systems.

The sample stand, open on three sides, offers the ability to measure almost any size or shape of sample, particularly large sample geometries. Thanks to our unique Jet-Stream technology within the sample stand the **FOUNDRY-MASTER Xline** can analyse most complex shapes with irregular sample geometries. Additionally, the sample does not need to completely seal the spark stand opening. Tubes, bars and even wires can be directly analysed, using only one universal adapter. This is a major operational advantage and strongly reduces the sample preparation time.

The unique design needs less cleaning than comparable systems, giving much longer operational time and less maintenance.

The cleaning process is fast and instrument recovery efficient due to pre-aligned parts and quick connectors.

The Argon consumption is reduced to a minimum, saving a considerable amount of operating expenses.



Spark emission spectrometers for foundries and metal producers

- Easy to use, even for untrained operators
- Maintenance-free vacuum technology
- Software tailored to the operator's needs, simplicity combined with efficiency

Technical Data		Solid State Digital Source	
Height	380 mm (15.0")	Computer controlled parameters	
Width	740 mm (30.0")	Frequency	100 – 400 Hz
Depth	880 mm (35.0")	Voltage	200 – 500 V
Weight	100 kg (230 lbs)	High Energy Pre Spark HEPS	
Mains power	90-250 VAC (50/60 Hz)	Readout System	
Operating mode	600 W	External PC workstation	
Standby mode	70 W	Incorporating up-to-date technology	
Vacuum System		Options	
Direct-path optical sample stand		Wire adapter set	
Low-noise vacuum pump		Sample preparation devices	
Shut-off-valve for easy replacement of the optical window		Spare parts kit	
		Consumables kit	
Optical System		Typical Applications	
Multi-CCD optical system with Paschen-Runge Mount		Analytical mode / Identification	
Resolution CCD	13 pm/pixel	Fe, alloys, cast-iron alloys	
Reciprocal dispersion	0.9 nm/mm (1st order)		
Focal length	350 mm		
Holographic grating	3000 g/mm		
Wavelength	165 – 750 nm		



www.oxford-instruments.com/foundrymaster for more information

This publication is the copyright of Oxford Instruments plc and provides further information only, when taken along with the company's working drawings. It is not to be used, copied or reproduced for any purpose or for any part of any work of contract or agreement as the representation of the company or its products. It is not to be used for any purpose other than the one for which it was intended. The company reserves the right to alter, without notice, the specifications, design or conditions of supply of any product or service. Oxford Instruments acknowledges all trademarks and registrations. © Oxford Instruments plc, 2013. All rights reserved. For info: 01295 012123



www.oxford-instruments.com

Anexo 8. Resultados del análisis de espectrofotometría.

FMX 52U0016 Optik 52U0017

Sample :

Alloy : FE_150 Mode : PA 01/12/2020 09:58:50

	Fe	C	Si	Mn	P	S	Pb
1	98.9	0.169	0.128	0.733	0.0219	0.0269	0.0019
2	98.9	0.180	0.129	0.724	0.0224	0.0249	0.0023
3	98.9	0.174	0.132	0.721	0.0226	0.0253	0.0013
4	98.8	0.183	0.127	0.748	0.0240	0.0251	0.0013
5	98.8	0.168	0.137	0.756	0.0235	0.0266	0.0027
6	98.8	0.182	0.135	0.752	0.0245	0.0275	0.0029
7	98.8	0.198	0.130	0.723	0.0236	0.0258	0.0023
8	98.8	0.186	0.130	0.736	0.0231	0.0266	0.0023
9	98.8	0.170	0.138	0.745	0.0227	0.0254	0.0021
10	98.8	0.190	0.133	0.730	0.0239	0.0241	0.0027
11	98.8	0.168	0.128	0.753	0.0237	0.0241	0.0019
12	98.8	0.180	0.128	0.738	0.0234	0.0242	0.0016
Average	98.8	0.179	0.131	0.738	0.0233	0.0255	0.0021

	Cr	Mo	Ni	Al	Co	Cu	Nb
1	0.0097	< 0.0010	0.0033	0.0116	< 0.0010	0.0038	< 0.0005
2	0.0093	< 0.0010	0.0035	0.0106	< 0.0010	0.0047	< 0.0005
3	0.0073	< 0.0010	0.0026	0.0094	< 0.0010	0.0038	< 0.0005
4	0.0093	< 0.0010	0.0028	0.0097	< 0.0010	0.0041	< 0.0005
5	0.0081	< 0.0010	0.0029	0.0101	< 0.0010	0.0039	< 0.0005
6	0.0088	< 0.0010	0.0020	0.0102	< 0.0010	0.0035	< 0.0005
7	0.0077	< 0.0010	0.0035	0.0112	< 0.0010	0.0043	< 0.0005
8	0.0082	< 0.0010	0.0026	0.0111	< 0.0010	0.0044	< 0.0005
9	0.0088	< 0.0010	0.0027	0.0102	< 0.0010	0.0038	< 0.0005
10	0.0078	< 0.0010	0.0020	0.0101	< 0.0010	0.0039	< 0.0005
11	0.0077	< 0.0010	0.0030	0.0132	< 0.0010	0.0042	< 0.0005
12	0.0077	< 0.0010	0.0024	0.0124	< 0.0010	0.0041	< 0.0005
Average	0.0084	< 0.0010	0.0028	0.0108	< 0.0010	0.0040	< 0.0005

	Ti	V	W	Sn	B	Ca	Zr
1	0.0028	0.0005	< 0.0100	< 0.0010	0.0014	0.0010	0.0046
2	0.0022	0.0006	< 0.0100	0.0013	0.0013	0.0010	0.0045
3	0.0032	< 0.0005	< 0.0100	< 0.0010	0.0015	0.0013	0.0049
4	0.0026	0.0013	< 0.0100	< 0.0010	0.0012	0.0009	0.0051
5	0.0029	0.0015	< 0.0100	0.0010	0.0013	0.0011	0.0054
6	0.0030	0.0011	< 0.0100	0.0011	0.0012	0.0009	0.0053
7	0.0025	0.0005	< 0.0100	< 0.0010	0.0012	0.0014	0.0047
8	0.0028	< 0.0005	< 0.0100	0.0010	0.0012	0.0013	0.0049
9	0.0029	0.0015	< 0.0100	< 0.0010	0.0012	0.0009	0.0049
10	0.0026	< 0.0005	< 0.0100	< 0.0010	0.0012	0.0008	0.0052
11	0.0025	0.0013	< 0.0100	< 0.0010	0.0012	0.0013	0.0055
12	0.0029	< 0.0005	< 0.0100	< 0.0010	0.0011	0.0012	0.0055
Average	0.0027	0.0008	< 0.0100	< 0.0010	0.0012	0.0011	0.0050

	Zn	Bi	As	Se	Sb
1	0.0012	0.0125	0.0021	0.0111	< 0.0030
2	0.0011	0.0128	0.0021	0.0110	< 0.0030
3	0.0012	0.0114	0.0028	0.0109	< 0.0030
4	0.0012	0.0118	0.0023	0.0109	< 0.0030
5	0.0011	0.0130	0.0020	0.0121	< 0.0030
6	0.0012	0.0135	0.0030	0.0121	< 0.0030
7	0.0012	0.0129	0.0023	0.0108	< 0.0030
8	0.0012	0.0129	0.0022	0.0113	< 0.0030
9	0.0012	0.0123	0.0029	0.0112	< 0.0030
10	0.0011	0.0136	0.0026	0.0115	< 0.0030
11	0.0012	0.0122	0.0027	0.0116	< 0.0030
12	0.0013	0.0118	0.0027	0.0112	< 0.0030
Average	0.0012	0.0126	0.0025	0.0113	< 0.0030

Anexo 9. Certificado de calibración del durómetro.



21 Industrial Avenue • Upper Saddle River NJ 07458
Telephone: (201) 962-7373 • Fax: (201) 962-0151
E-Mail: info@phase2plus.com

Certificate of Calibration for Rockwell Hardness Tester

Model: 900-365
Temperature: 21°C
QC Technician: SJT

Serial No. 20JA142015
Humidity: 30%

Date: February 19, 2015
Method: ASTM E18
Diamond Indenter: n/a

Verification of Test Force				
	Standard Value	Reading Force	Error	Maximum Error ASTM E18
Pre-load (kgf)	10	10.03	+0.03%	±2%
Full load (kgf)	60	60.04	+0.07%	±0.25%
	100	100.15	+0.15%	±0.65%
	150	150.13	+0.09%	±0.60%

Verification of Depth Measuring Device			
Given Depth Movement in Microns	Depth Reading by Hardness Tester	Error	Maximum Error ASTM E18
60µm	60.1µm	+0.1µm	±1µm
110µm	110.3µm	+0.3µm	±1µm
160µm	159.8µm	-0.2µm	±1µm

Indirect Verification										
Standard Blocks	Test Results					Avg.	Error	Maximum Error	Repeatability	Maximum Repeatability
	H1	H2	H3	H4	H5					
83.7HRA	83.5	83.7	83.9	83.8	83.7	83.7	0	±0.5	0.4	1.0
92.9HRB	92.2	93.0	92.9	93.0	93.2	92.9	0	±1.0	1.0	1.5
63.5HRC	63.1	63.1	63.4	63.2	63.4	63.2	+0.3	±0.5	0.2	1.0
46.7HRC	46.6	46.7	46.5	46.7	46.8	46.7	0	±1.0	0.3	1.0
29.1HRC	29.0	29.3	29.5	29.4	29.2	29.3	+0.2	±1.0	0.5	2.0

The above testing machine has been verified to the requirements of ASTM E18. All test blocks used for calibration are NIST traceable and conform to ASTM E18-14.

Approved By:

• Material Testing Instruments • Machine Tool Accessories • Precision Measuring Tools •
www.phase2plus.com



Anexo 10. Horno de tratamientos térmicos [42].



Hornos de cámara calentamiento eléctrico



Horno de cámara N 41/H



Horno de cámara N 321 con estibador de carga

Estos hornos universales de cámara con calentamiento por radiación están diseñados para el uso en condiciones difíciles en el taller. Son muy aptos para los procesos en la fabricación de herramientas y para templar, como p. ej. recocido, temple o forja. Estos hornos se pueden adaptar de forma precisa a la aplicación deseada, empleando diferentes accesorios

- Diseño compacto y robusto
- Horno con cámara de gran profundidad con calentamiento por tres lados: ambos laterales y la solera
- Los elementos calefactores de los tubos de apoyo proporcionan una radiación libre del calor y una larga vida útil
- Placa SiC termoconductiva para la protección de la calefacción de solera
- Lado superior de la puerta protegida con chapas de acero fino contra quemaduras al abrir el horno bajo altas temperaturas
- Soporte incluido en el suministro, el modelo N 7/H - N 17/HR está disponible como modelo de sobremesa
- Apertura de aire de escape en el lado del horno, a partir de horno de cámara N 31/H en la parte trasera del horno
- Homogeneidad de la temperatura en base a la norma DIN 17052-1 de hasta +/- 10 °C véase página 84
- Bajo consumo energético debido a la estructura aislante de varias capas
- Movimiento de la puerta mediante amortiguador de presión de gas
- Pintura zinc resistente al calor para protección de puerta y marco (a partir de modelo N 81)
- Uso conforme al destino en el marco de las instrucciones de servicio
- NTLog básico para controladores Nabertherm: registro de datos de proceso sobre memoria USB
- Descripción de la regulación véase página 80



Para el equipamiento opcional vease el catalogo de „Tecnología para Procesos Térmicos I“

Modelo	Tmáx °C	Dimensiones interiores en mm			Volumen en l	Dimensiones exteriores en mm			Potencia calorífica en kW ³	Conexión eléctrica*	Peso en kg
		anch.	prof.	alt.		Anch.	Prof.	Alt.			
N 7/H ¹	1280	250	250	140	9	800	650	600	3,0	monofásica	60
N 11/H ¹	1280	250	350	140	11	800	750	600	3,5	monofásica	70
N 11/HR ¹	1280	250	350	140	11	800	750	600	5,5	trifásica ²	70
N 17/HR ¹	1280	250	500	140	17	800	900	600	6,4	trifásica ²	90
N 31/H	1280	350	350	250	30	1040	1100	1340	15,0	trifásica	210
N 41/H	1280	350	500	250	40	1040	1250	1340	15,0	trifásica	260
N 61/H	1280	350	750	250	60	1040	1500	1340	20,0	trifásica	400
N 87/H	1280	350	1000	250	87	1040	1750	1340	25,0	trifásica	480
N 81	1200	500	750	250	80	1140	1900	1790	20,0	trifásica	820
N 161	1200	550	750	400	160	1180	1930	1980	30,0	trifásica	910
N 321	1200	750	1100	400	320	1400	2270	2040	47,0	trifásica	1300
N 641	1200	1000	1300	500	640	1690	2670	2240	70,0	trifásica	2100
N 81/13	1300	500	750	250	80	1220	1960	1840	22,0	trifásica	900
N 161/13	1300	550	750	400	160	1260	1990	2030	35,0	trifásica	1000
N 321/13	1300	750	1100	400	320	1480	2330	2090	60,0	trifásica	1500
N 641/13	1300	1000	1300	500	640	1770	2730	2290	80,0	trifásica	2500

¹Modelo de mesa

²Calefacción sólo entre dos fases

*Para la conexión eléctrica véase página 89

³Potencia dependiendo del diseño del horno. Según la carga, puede aumentar

Anexo 11. Aceite Durixol W25 [43].

bonGROUP

¡Mantenerse sano! +++ Nuestro equipo está disponible incluso en tiempos difíciles. Realizamos sus pedidos

BURGDORF

OSMIROL

NUSSLE

ACEITES PARA QUARKING DE MÚLTIPLES ÁREAS CON TRIMESTRE DE BAJA DISTRESS

La característica más importante de los aceites de temple multigrado DURIXOL y SYNABOL con un efecto de enfriamiento de bajo alabeo es su comportamiento de enfriamiento aumentado y al mismo tiempo particularmente de bajo estrés. Estos aceites son particularmente adecuados para enfriar componentes sensibles a la deformación y al agrietamiento hechos de calidades de acero de mayor aleación y geometrías de componentes complejos. Permiten incluso resultados de endurecimiento de baja distorsión.

Debido al diseño especial del producto de los aceites de enfriamiento multigrado, el comportamiento de enfriamiento se puede ajustar estableciendo temperaturas de baño de aceite más altas.

La alta estabilidad del producto sin igual permite resultados de enfriamiento permanentemente estables. Incluso a temperaturas de aplicación elevadas, los aceites tienen una vida útil prácticamente ilimitada y requieren un control mínimo y mantenimiento del baño.

La resistencia a la evaporación extraordinariamente alta da como resultado un comportamiento de enfriamiento particularmente uniforme en toda la sección transversal del lote. El cambio más pequeño en tamaño y forma también ayuda a reducir los costos del proceso.

producto	Viscosidad cinemática (40 ° C)	Punto de inflamación COC	Temperatura de aplicación	Áreas típicas de aplicación
DURIXOL W55HS	63 mm ² / s	230 ° C	50-130 ° C	Apagado de la urdimbre y grietas componentes sensibles como. B. de engranajes y piezas de acoplamiento, herramientas y piezas de estampación fina; se puede usar en sistemas de enfriamiento cerrados y abiertos
DURIXOL 5500	37 mm ² / s	253 ° C	50-130 ° C	
DURIXOL W21	33 mm ² / s	215 ° C	50-130 ° C	
DURIXOL W25	46 mm ² / s	228 ° C	50-150 ° C	
SYNABOL 310	56 mm ² / s	300 ° C	100-180 ° C	Para aplicaciones especiales, solo en sistemas de enfriamiento abiertos
SYNABOL 2000	34 mm ² / s	246 ° C	50-130 ° C	

Materiales típicos: 16MnCr5, 20MnCr5, 20MoCr4, 25MoCr4, 18CrNiMo7-6, 90MnCrV8, 100Cr6, X38CrMoV5-3, 45NiCrMoV16-6, 48CrMoV6-6, 115CrV3V12C12V12V12M12C12



Anexo 12. Horno para revenido [42].

Nabertherm

MORE THAN HEAT 30•3000 °C

Taller para sistema de templado MHS 17

El sistema de templado MHS 17 se ha diseñado de forma modular y consta de una mesa para los hornos de tratamiento térmico, un baño de aceite para el enfriamiento y un baño de agua para llevar a cabo la limpieza de las piezas. Opcionalmente, los baños se pueden suministrar con calentamiento. Los baños se montan a la derecha e izquierda de la mesa y disponen de cestas de carga para poder mover las piezas en el baño y conseguir un enfriamiento uniforme. Todas las piezas pueden pedirse por separado, de forma que el sistema de templado pueda combinarse o incluso reequiparse de forma personalizada según los aceros que deban procesarse.

Para aceros para temple al aire el MHS 17 puede ampliarse con un sistema de templado al aire. Esta mesa está equipada con un ventilador de refrigeración de elevada potencia para enfriar en aire las piezas que deben templarse, p. ej. también la bolsa de recocido para la inyección de gas con soporte. Para colocar las cajas y piezas calientes se usa una base de ladrillo ligero refractario. Los baños de enfriamiento también pueden fijarse en el sistema de templado al aire.

Para depositar los accesorios y/o para realizar la carga puede integrarse una mesa de recepción adicional en el sistema.

Equipamiento opcional véase página 70.



MHS 17

Modelo	Tmáx °C	Dimensiones internas en mm			Volumen en l	Dimensiones externas en mm			Potencia calorífica en kW²	Conexión eléctrica*	Peso en kg
		anch.	prof.	alt.		Anch.	Prof.	Alt.			
para MHS 17											
N 7/H	1280	250	250	120	7	720	640	510	3,0	monofásica	
N 11/H	1280	250	350	140	11	720	740	510	3,6	monofásica	70
N 11/HR	1280	250	350	140	11	720	740	510	5,5	trifásica¹	70
N 17/HR	1280	250	500	140	17	720	890	510	6,4	trifásica¹	90
N 15/65HA	650	295	340	170	15	470	845	460	2,4	monofásica	55

¹Calefacción sólo entre dos fases

²Potencia dependiendo del diseño del horno. Según la carga, puede aumentar

*Para la conexión eléctrica véase página 89

Núm. art.	Artículo	Dimensiones externas en mm			Volumen en l	Medidas de la rejilla de carga		Potencia kW	Tensión de conexión
		Anch.	Prof.	Alt.		Anchura en mm	Longitud en mm		
631006421	Mesa	1000	850	760	-	-	-	-	-
631006407	Baño de aceite	280	510	510	50	400	200	-	-
631006408	Baño de agua	280	510	510	50	400	200	-	-
631001011	Elemento calefactor (baño de aceite)	-	-	-	-	-	-	3,0	230 V
631001012	Elemento calefactor (baño de agua)	-	-	-	-	-	-	3,0	230 V
631000429	Sistema de templado al aire (mesa de enfriamiento)	560	610	760	-	400	200	0,2	230 V
631000442	Mesa de depósito	560	610	760	-	-	-	-	-